

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 Date of Application: 2002年10月 2日

出願番号 Application Number: 特願 2002-290107

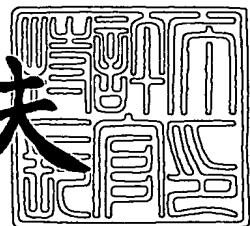
[ST. 10/C]: [JP 2002-290107]

出願人 Applicant(s): 株式会社東芝

2003年 7月18日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 A000203177

【提出日】 平成14年10月 2日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 G02F 3/00

G06F 7/48

【発明の名称】 量子情報通信方法及び量子情報通信装置

【請求項の数】 11

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

【氏名】 市村 厚一

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

【氏名】 塩川 教次

【特許出願人】

【識別番号】 000003078

【氏名又は名称】 株式会社 東芝

【代理人】

【識別番号】 100058479

【弁理士】

【氏名又は名称】 鈴江 武彦

【電話番号】 03-3502-3181

【選任した代理人】

【識別番号】 100084618

【弁理士】

【氏名又は名称】 村松 貞男

【選任した代理人】

【識別番号】 100068814

【弁理士】

【氏名又は名称】 坪井 淳

【選任した代理人】

【識別番号】 100092196

【弁理士】

【氏名又は名称】 橋本 良郎

【選任した代理人】

【識別番号】 100091351

【弁理士】

【氏名又は名称】 河野 哲

【選任した代理人】

【識別番号】 100088683

【弁理士】

【氏名又は名称】 中村 誠

【選任した代理人】

【識別番号】 100070437

【弁理士】

【氏名又は名称】 河井 将次

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 011567

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 量子情報通信方法及び量子情報通信装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

それぞれ少なくとも異なる三つのエネルギー準位を有する原子からなり、 i に関する昇順に配列された複数の集合 $A(i)$ (ただし、 i は $1 \leq i \leq 2^r$ を満たす整数であり、 r は $r \geq 2$ を満たす整数。) であって、前記三つのエネルギー準位のうちの最低エネルギー準位にある複数の物理系集合を利用して、物理系集合 $A(1)$ と $A(2^r)$ との間にエンタングルメントを生成する量子情報通信装置であって、

第1の中心角周波数の光と第2の中心角周波数の光とを発生する光源と、前記光源と前記各物理系集合 $A(i)$ との間の光路上に、前記複数の物理系集合 $A(i)$ 每に対応して設けられる光シャッターと、前記各光シャッターの開閉タイミングを制御する制御手段と、を有する光学系と、

前記光学系に光学的に接続され、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて、前記複数の物理系集合のうち、 $A(2k-1)$ (ただし、 k は $k = 1, \dots, 2^r-1$ の整数) と $A(2k)$ との間にエンタングルメントを生成する第1層と、

前記光学系に光学的に接続され、入射した前記第2の中心角周波数の光に基づいて、前記複数の物理系集合のうち、 $A(2^q m_q - 2^q - 1)$ と $A(2^q m_q - 2^q - 1 + 1)$ (ただし、 $m_q = 1, 2, \dots, 2^r - q$ までの整数であり、 q は $2 \leq q \leq r$ を満たす整数。) との間にエンタングルメントを生成する第 q 層と、

を具備し、

前記第1層は、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A(2k-1)$ から出射された第3の中心角周波数の光と前記物理系集合 $A(2k)$ から出射された前記第3の中心角周波数の光とを混合し、第1の光及び第2の光として異なる方向に出射する第1の光混合手段と、前記第1の光を検出する第1の検出器及び前記第2の光を検出する第2の検出器と、を有し、

前記第 q 層は、入射した前記第2の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合A ($2^q m_q - 2^q - 1$) から出射された第4の中心角周波数の光と前記物理系集合A ($2^q m_q - 2^q - 1 + 1$) から出射された前記第4の中心角周波数の光とを混合し、第3の光及び第4の光として異なる方向に出射する第2の光混合手段と、前記第3の光を検出する第3の検出器及び前記第4の光を検出する第4の検出器と、を有し、

前記制御手段は、前記第1の検出器又は前記第2の検出器による光の検出に応答して、前記物理系集合のうち、A ($2^k - 1$) に対応する前記光シャッターとA (2^k) に対応する前記光シャッターとを閉鎖し、前記第3の検出器又は前記第4の検出器による光の検出に応答して、前記物理系集合のうち、A ($2^q m_q - 2^q - 1$) に対応する前記光シャッターとA ($2^q m_q - 2^q - 1 + 1$) に対応する前記光シャッターとを閉鎖すること、

を特徴とする量子情報通信装置。

【請求項2】

前記第1の中心角周波数と第2の中心角周波数とが等しいことを特徴とする請求項1記載の量子情報通信装置。

【請求項3】

それぞれ少なくとも異なる三つのエネルギー準位を有する原子からなり、 i に関して昇順に配列された複数の集合A (i) (ただし、 i は $1 \leq i \leq 2^r$ を満たす整数であり、 r は $r \geq 2$ を満たす整数。) であって、原子が、前記三つのエネルギー準位のうちの最低エネルギー準位にある複数の物理系集合を利用して、物理系集合A (1) とA (2^r) との間にエンタングルメントを生成する量子情報通信装置であって、

第1の中心角周波数の光を発生する光源と、前記光源と前記各物理系集合A (i) との間の光路上に、前記複数の物理系集合A (i) 每に対応して設けられる光シャッターと、前記各光シャッターの開閉タイミングを制御する制御手段と、前記光源と前記各光シャッターとの間の前記光路上に、前記各光シャッターに対応して設けられ、前記光源が発生する前記第1の中心角周波数の光を分枝させる複数の光分割手段と、有する光学系と、

前記光学系に光学的に接続され、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて、前記複数の物理系集合のうち、 $A_{(2k-1)}$ （ただし、 k は $k=1, 2, 3, \dots, 2^r-1$ の整数）と $A_{(2k)}$ との間にエンタングルメントを生成する第1層と、

前記光学系に光学的に接続され、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて、前記複数の物理系集合のうち、 $A_{(2^q m_q - 2^q - 1)}$ と $A_{(2^q m_q - 2^q - 1 + 1)}$ （ただし、 $m_q = 1, 2, \dots, 2^r - q$ までの整数であり、 q は $2 \leq q \leq r$ を満たす整数。）との間にエンタングルメントを生成する第 q 層と、

を具備し、

前記第1層は、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A_{(2k-1)}$ から出射された第2の中心角周波数の光と、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A_{(2k)}$ から出射された第2の中心角周波数の光と、を混合し、第1の光及び第2の光として異なる方向に出射する第1の光混合手段と、前記第1の光を検出する第1の検出器及び前記第2の光を検出する第2の検出器と、を有し、

前記第 q 層は、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A_{(2^q m_q - 2^q - 1)}$ から出射された第3の中心角周波数の光と、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A_{(2^q m_q - 2^q - 1 + 1)}$ から出射された第3の中心角周波数の光と、を混合し、第3の光及び第4の光として異なる方向に出射する第2の光混合手段と、前記第3の光を検出する第3の検出器及び前記第4の光を検出する第4の検出器と、を有し、

前記制御手段は、前記第1の検出器又は第2の検出器による光の検出に応答して、前記物理系集合のうち、 $A_{(2k-1)}$ に対応する前記光シャッターと $A_{(2k)}$ に対応する前記光シャッターとを閉鎖し、前記第3の検出器又は第4の検出器による光の検出に応答して、前記物理系集合のうち、 $A_{(2^q m_q - 2^q - 1)}$ に対応する前記光シャッターと $A_{(2^q m_q - 2^q - 1 + 1)}$ に対応する前記光シャッターとを閉鎖すること、

を特徴とする量子情報通信装置。

【請求項 4】

前記各光シャッターは、電気光学素子又は音響光学素子であることを特徴とする請求項1乃至3のうちいずれか一項記載の量子情報通信装置。

【請求項 5】

前記光源が発生する光が伝播する光路の少なくとも一部は、光ファイバーであることを特徴とする請求項1乃至4のうちいずれか一項記載の量子情報通信装置。

【請求項 6】

前記複数の物理系集合のそれぞれは、固体材料中に分散させた希土類イオンの集合であることを特徴とする請求項1乃至5のうちいずれか一項記載の量子情報通信装置。

【請求項 7】

前記複数の物理系集合のそれぞれは、光ファイバー中に分散された希土類イオンの集合であることを特徴とする請求項1乃至5のうちいずれか一項記載の量子情報通信装置。

【請求項 8】

前記複数の物理系集合のそれぞれは、密閉された空間に保持された気体であることを特徴とする請求項1乃至5のうちいずれか一項記載の量子情報通信装置。

【請求項 9】

前記複数の物理系集合のそれぞれは、光共振器内に配置されていることを特徴とする請求項1乃至5のうちいずれか一項記載の量子情報通信装置。

【請求項 10】

それぞれ少なくとも異なる三つのエネルギー準位を有する原子からなり、 i に関して昇順に配列された複数の物理系集合 $A(i)$ （ただし、 i は $1 \leq i \leq 2^r$ を満たす整数であり、 r は $r \geq 2$ を満たす整数。）であって、原子を最初、前記三つのエネルギー準位のうちの最低エネルギー準位に用意した複数の物理系集合を利用して、物理系集合 $A(1)$ と $A(2^r)$ との間にエンタングルメントを生成する方法であって、

前記複数の物理系集合のそれぞれと光源との間に設けられた複数の光シャッタ

一を開いて、前記光源が発生する第1の中心角周波数の光を前記各物理系集合に照射することで、前記複数の物理系集合のうち、 $A_{(2k-1)}$ （ただし、 k は $k=1, \dots, 2r-1$ の整数）と $A_{(2k)}$ とから第3の中心角周波数の光を発生させ、

前記物理系集合 $A_{(2k-1)}$ から出射された第3の中心角周波数の光と前記物理系集合 $A_{(2k)}$ から出射された第3の中心角周波数の光とを混合して、第1の光と第2の光として異なる方向に出射させ、

前記第1の光又は前記第2の光を検出器で検出することで、前記物理系集合 $A_{(2k-1)}$ と前記物理系集合 $A_{(2k)}$ との間にエンタングルメントを生成し

前記検出器の検出動作に連動して、前記物理系集合 $A_{(2k-1)}$ に対応する前記光シャッターと前記物理系集合 $A_{(2k)}$ に対応する前記光シャッターとを閉鎖し、その後、

前記複数の物理系集合のうちの $A_{(2qm_q-2q-1)}$ と $A_{(2qm_q-2q-1+1)}$ （ただし、 $m_q=1, 2, \dots, 2r-q$ までの整数であり、 q は $2 \leq q \leq r$ を満たす整数。）に対応する前記光シャッターを開いて、光源が発生する第2中心角周波数の光を前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1)}$ と $A_{(2qm_q-2q-1+1)}$ （ただし、 $m_q=1, 2, \dots, 2r-q$ までの整数であり、 q は $2 \leq q \leq r$ を満たす整数。）とのそれぞれに照射することで、前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1)}$ と前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1+1)}$ とから第4の中心角周波数の光を発生させ、

前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1)}$ から出射された第4の中心角周波数の光と前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1+1)}$ から出射された第4の中心角周波数の光とを混合して、第3の光と第4の光として異なる方向に出射させ、

前記第3の光又は前記第4の光を検出器で検出することで、前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1)}$ と前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1+1)}$ との間にエンタングルメントを生成し、

前記検出器の検出動作に連動して、前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1)}$ に対応する前記光シャッターと前記物理系集合 $A_{(2qm_q-2q-1+1)}$ に

対応する前記光シャッターとを閉鎖すること、
を特徴とする量子情報通信方法。

【請求項 11】

前記第1の中心角周波数と第2の中心角周波数とが等しいことを特徴とする請求項10記載の量子情報通信方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、量子情報通信、例えば長距離間の量子テレポーテーション、量子暗号等の量子情報通信を可能にするために、デコヒーレンスが起こる前に、速やかに遠距離間にエンタングルメントを生成する方法およびその装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

従来提案されていた量子テレポーテーション、量子暗号等の量子情報通信では、一箇所で発生し、エンタングルメント状態（量子力学的な絡まった状態）にある2つの光を発振側と受信側の双方に伝送し、その2つの光の間に存在する量子相関を利用して通信を行っている（A. Furusawa et al. Science, 282, 06, (1998)、A. K. Ekert, Phys. Rev. Lett., 67(6), 661(1991)。しかし、量子状態は複製不可能なため、伝送中の增幅や中継ができず、通信距離は光の減衰距離程度以内に限られている。また、通常の增幅、中継によって通信距離を延ばすことができないという状況は、エンタングルメントを利用しない量子暗号（C. H. Bennett et al., Scientific American, October, (1992)）でも同じであり、それらを含めた量子情報通信の実用化において、大きな共通の課題となっている。

【0003】

近年、L. M. Duan達によって、離れた気体の原子集団を光で結合し、原子集団同士をエンタングルさせる方法が提案された（例えば、非特許文献1参照。）。

【0004】

この方法では、離れた場所にある2つの原子集団（AとBとする）にレーザー

を照射し、それぞれから発生した光子を特殊な方法で観測することにより、AとBとをエンタングルさせる。さらに、このようにしてお互いエンタングルした原子集団の対(A (u) - B (u) とする。ただし、 $u = 1, 2, 3 \dots$) を複数個生成した後、その片方ずつ(例えば、A (1) - B (1)、A (2) - B (2) の各対における、B (1) と A (2)) に光を作用させて、それぞれの原子集団から発生した光子を特殊な方法で観測することにより、他の片方同士(すなわち、B (2) と A (1)) を新たにエンタングルさせることができる。

【0005】

このような二つの原子集団間に生成されるエンタングルメントを複数結合すれば、光の減衰距離以上の長距離でエンタングルメント生成の可能性がある。また単一光子や原子ではない、原子集団の量子状態であるため、ノイズに強いという利点がある。

【0006】

このエンタングルメントを結合していくことによる長距離化では、何段階もの結合を如何に速やかに、全体のコピーレンサーが保たれている時間内に達成できるかによって、最終的に量子情報通信が可能な距離が決まる。例えば、このような量子通信の手段を、扱いやすく、小型化、素子化に有利な固体材料で構築しようとする場合、一般に固体材料のデコヒーレンス時間は短いため、特にエンタングルメントの結合の達成時間短縮は、必須の課題となる。

【0007】

しかしながら、従来、動作時間のかかる機械的駆動部分なしで、すばやくエンタングルメントの結合に必要な光を必要箇所に照射し、効率よく長距離間のエンタングルメントを生成する具体的方法、構成は知られていない。

【0008】

【非特許文献1】

L. M. Duan, Nature, 414, 413(2001)

【0009】

【発明が解決しようとする課題】

本発明は、上記事情を鑑みてなされたもので、動作時間のかかる機械的駆動を

採用せずに、すばやく効率よくエンタングルメントの結合を行い、長距離間のエンタングルメント生成を可能にする方法及び装置を提供することを目的としている。

【0010】

【課題を解決するための手段】

本発明は、上記目的を達成するため、次のような手段を講じている。

【0011】

本発明の第1の視点は、それぞれ少なくとも異なる三つのエネルギー準位を有する原子からなり、 i に関して昇順に配列された複数の集合 $A(i)$ （ただし、 i は $1 \leq i \leq 2^r$ を満たす整数であり、 r は $r \geq 2$ を満たす整数。）であって、前記三つのエネルギー準位のうちの最低エネルギー準位にある複数の物理系集合を利用して、物理系集合 $A(1)$ と $A(2^r)$ との間にエンタングルメントを生成する量子情報通信装置であって、第1の中心角周波数の光と第2の中心角周波数の光とを発生する光源と、前記光源と前記各物理系集合 $A(i)$ との間の光路上に、前記複数の物理系集合 $A(i)$ 毎に対応して設けられる光シャッターと、前記各光シャッターの開閉タイミングを制御する制御手段と、を有する光学系と、前記光学系に光学的に接続され、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて、前記複数の物理系集合のうち、 $A(2k-1)$ （ただし、 k は $k=1, \dots, 2^r-1$ の整数）と $A(2k)$ との間にエンタングルメントを生成する第1層と、前記光学系に光学的に接続され、入射した前記第2の中心角周波数の光に基づいて、前記複数の物理系集合のうち、 $A(2qm_q-2q-1)$ と $A(2qm_q-2q-1+1)$ （ただし、 $m_q=1, 2, \dots, 2^r-q$ までの整数であり、 q は $2 \leq q \leq r$ を満たす整数。）との間にエンタングルメントを生成する第 q 層と、を具備し、前記第1層は、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A(2k-1)$ から出射された第3の中心角周波数の光と前記物理系集合 $A(2k)$ から出射された前記第3の中心角周波数の光とを混合し、第1の光及び第2の光として異なる方向に出射する第1の光混合手段と、前記第1の光を検出する第1の検出器及び前記第2の光を検出する第2の検出器と、を有し、前記第 q 層は、入射した前記第2の中心角周波数の光に基づいて前

記物理系集合A ($2^q m_q - 2^q - 1$) から出射された第4の中心角周波数の光と前記物理系集合A ($2^q m_q - 2^q - 1 + 1$) から出射された前記第4の中心角周波数の光とを混合し、第3の光及び第4の光として異なる方向に出射する第2の光混合手段と、前記第3の光を検出する第3の検出器及び前記第4の光を検出する第4の検出器と、を有し、前記制御手段は、前記第1の検出器又は前記第2の検出器による光の検出に応答して、前記物理系集合のうち、A ($2^k - 1$) に対応する前記光シャッターとA (2^k) に対応する前記光シャッターとを閉鎖し、前記第3の検出器又は前記第4の検出器による光の検出に応答して、前記物理系集合のうち、A ($2^q m_q - 2^q - 1$) に対応する前記光シャッターとA ($2^q m_q - 2^q - 1 + 1$) に対応する前記光シャッターとを閉鎖すること、を特徴とする量子情報通信装置である。

【0012】

本発明の第2の視点は、それぞれ少なくとも異なる三つのエネルギー準位を有する原子からなり、iに関して昇順に配列された複数の集合A (i) (ただし、iは $1 \leq i \leq 2^r$ を満たす整数であり、rは $r \geq 2$ を満たす整数。[¶] であって、原子が、前記三つのエネルギー準位のうちの最低エネルギー準位にある複数の物理系集合を利用して、物理系集合A (1) とA (2^r) との間にエンタングルメントを生成する量子情報通信装置であって、第1の中心角周波数の光を発生する光源と、前記光源と前記各物理系集合A (i) との間の光路上に、前記複数の物理系集合A (i) 毎に対応して設けられる光シャッターと、前記各光シャッターの開閉タイミングを制御する制御手段と、前記光源と前記各光シャッターとの間の前記光路上に、前記各光シャッターに対応して設けられ、前記光源が発生する前記第1の中心角周波数の光を分枝させる複数の光分割手段と、有する光学系と、前記光学系に光学的に接続され、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて、前記複数の物理系集合のうち、A ($2^k - 1$) (ただし、kはk = 1, 2, 3, ..., $2^r - 1$ の整数) とA (2^k) との間にエンタングルメントを生成する第1層と、前記光学系に光学的に接続され、入射した前記第1の中心角周波数の光に基づいて、前記複数の物理系集合のうち、A ($2^q m_q - 2^q - 1$) とA ($2^q m_q - 2^q - 1 + 1$) (ただし、 $m_q = 1, 2, \dots, 2^r - q$ まで

の整数であり、 q は $2 \leq q \leq r$ を満たす整数。) との間にエンタングルメントを生成する第 q 層と、を具備し、前記第 1 層は、入射した前記第 1 の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A (2k-1)$ から出射された第 2 の中心角周波数の光と、入射した前記第 1 の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A (2k)$ から出射された第 2 の中心角周波数の光と、を混合し、第 1 の光及び第 2 の光として異なる方向に出射する第 1 の光混合手段と、前記第 1 の光を検出する第 1 の検出器及び前記第 2 の光を検出する第 2 の検出器と、を有し、前記第 q 層は、入射した前記第 1 の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A (2qm_q - 2q - 1)$ から出射された第 3 の中心角周波数の光と、入射した前記第 1 の中心角周波数の光に基づいて前記物理系集合 $A (2qm_q - 2q - 1 + 1)$ から出射された第 3 の中心角周波数の光と、を混合し、第 3 の光及び第 4 の光として異なる方向に出射する第 2 の光混合手段と、前記第 3 の光を検出する第 3 の検出器及び前記第 4 の光を検出する第 4 の検出器と、を有し、前記制御手段は、前記第 1 の検出器又は第 2 の検出器による光の検出に応答して、前記物理系集合のうち、 $A (2k-1)$ に対応する前記光シャッターと $A (2k)$ に対応する前記光シャッターとを閉鎖し、前記第 3 の検出器又は第 4 の検出器による光の検出に応答して、前記物理系集合のうち、 $A (2qm_q - 2q - 1)$ に対応する前記光シャッターと $A (2qm_q - 2q - 1 + 1)$ に対応する前記光シャッターとを閉鎖することを特徴とする量子情報通信装置である。

【0013】

本発明の第 3 の視点は、それぞれ少なくとも異なる三つのエネルギー準位を有する原子からなり、 i に関して昇順に配列された複数の物理系集合 $A (i)$ (ただし、 i は $1 \leq i \leq 2^r$ を満たす整数であり、 r は $r \geq 2$ を満たす整数。) であって、原子を最初、前記三つのエネルギー準位のうちの最低エネルギー準位に用意した複数の物理系集合を利用して、物理系集合 $A (1)$ と $A (2^r)$ との間にエンタングルメントを生成する方法であって、前記複数の物理系集合のそれぞれと光源との間に設けられた複数の光シャッターを開いて、前記光源が発生する第 1 の中心角周波数の光を前記各物理系集合に照射することで、前記複数の物理系集合のうち、 $A (2k-1)$ (ただし、 k は $k = 1, \dots, 2^r - 1$ の整数)

とA (2 k) とから第3の中心角周波数の光を発生させ、前記物理系集合A (2 k - 1) から出射された第3の中心角周波数の光と前記物理系集合A (2 k) から出射された第3の中心角周波数の光とを混合して、第1の光と第2の光として異なる方向に出射させ、前記第1の光又は前記第2の光を検出器で検出することで、前記物理系集合A (2 k - 1) と前記物理系集合A (2 k) との間にエンタングルメントを生成し、前記検出器の検出動作に連動して、前記物理系集合A (2 k - 1) に対応する前記光シャッターと前記物理系集合A (2 k) に対応する前記光シャッターとを閉鎖し、その後、前記複数の物理系集合のうちのA (2 q m_q - 2 q - 1) とA (2 q m_q - 2 q - 1 + 1) (ただし、m_q = 1, 2, ..., 2^r - qまでの整数であり、qは2 ≤ q ≤ rを満たす整数。) に対応する前記光シャッターを開いて、光源が発生する第2中心角周波数の光を前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1) とA (2 q m_q - 2 q - 1 + 1) (ただし、m_q = 1, 2, ..., 2^r - qまでの整数であり、qは2 ≤ q ≤ rを満たす整数。) とのそれぞれに照射することで、前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1) と前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1 + 1) とから第4の中心角周波数の光を発生させ、前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1) から出射された第4の中心角周波数の光と前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1 + 1) から出射された第4の中心角周波数の光とを混合して、第3の光と第4の光として異なる方向に出射させ、前記第3の光又は前記第4の光を検出器で検出することで、前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1) と前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1 + 1) との間にエンタングルメントを生成し、前記検出器の検出動作に連動して、前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1) に対応する前記光シャッターと前記物理系集合A (2 q m_q - 2 q - 1 + 1) に対応する前記光シャッターとを閉鎖することを特徴とする量子情報通信方法である。

【0014】

このような構成によれば、動作時間のかかる機械的駆動を採用せずに、すばやく効率よくエンタングルメントの結合を行い、長距離間のエンタングルメント生成を可能にする量子情報通信方法および量子情報通信装置を実現することができる。

【0015】

【発明の実施の形態】

まず、本実施形態に係る量子情報通信方法の基礎となる理論について説明する。

【0016】

2つの離れた場所にある物理系の集団に対し、エンタングルメントを生成できる可能性のある方法が、L. M. Duan 達によって提案されている (L. M. Duan, et al., Nature, 414, 413(2001))。以下その方法を説明する。

【0017】

彼等の方法では、基底状態から見てエネルギー準位の低い順番に $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ の3つの状態を持つ物理系の集団として気体の原子集団を想定している。なお、各原子集団において、 $|1\rangle$ と $|3\rangle$ との間及び $|2\rangle$ と $|3\rangle$ との間は、光学的に遷移可能であり、 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ との間は、光学的遷移が実質的に不可能であるとする。このような原子集団A (i) をn個用意し ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)、図1に示すように i の昇順に一列に並んでいいるとする。以下、A (1) とA (n) との間にエンタングルメントを生成する場合を例に、Duan達の手法について説明する。

【0018】

まず、A (1) とA (2) とに対して、そこに含まれる物理系を状態 $|1\rangle$ にする。次に、図2に示すように、 $|1\rangle$ と $|3\rangle$ との間の遷移に対して大きな離調 Δ をもつ角周波数 ω_1 のレーザーを照射する (図3参照)。その際、準位 $|2\rangle$ へのラマン遷移により、照射光と同じ向きに前方散乱されるストークスラマン散乱光の平均光子数が1より十分小さくなる程度の短パルス光を用いる。ストークスラマン光が1光子発生した場合、原子集団の状態は、 $S^\dagger |0\rangle_a$ で表される。ただし S は対称な集団モードの励起を表す演算子であり、 $S \equiv 2N_a^{1/2} \sum_i |1\rangle_i |2\rangle_i$ と表される。ここで、 N_a は原子集団に含まれる原子数である。ここでは簡単のため、 N_a は全ての原子集団で同数と考える。また、 $|0_a\rangle$ は、原子集団の基底状態であり、次のように表すことが出来る。

【0019】

【数1】

$$|0_a\rangle \equiv \otimes_i |1\rangle_i$$

【0020】

この場合、放出した光子まで含めた全体の状態 $|\psi\rangle$ は、次の（1）の様に表される。

$$|\psi\rangle = |0_a\rangle |0_p\rangle + p_c^{1/2} S^\dagger a^\dagger |0_a\rangle |0_p\rangle + o(p_c) \quad (1)$$

ただし $|0_a\rangle$ は、発生するストークスラマン散乱光モードの真空の状態、 a^\dagger はそのモードに発生する光子の消滅演算子、 p_c は小さな値をとる励起確率（光子発生の確率）、 $o(p_c)$ は光子を2個以上発生する確率で、 p_c^2 以下の小さな値をとる。

【0021】

図4は、A(1)とA(2)との間でエンタングルメントを生成する装置の一部の例を示した図である。光路は、A(1)とA(2)とに同時に角周波数 ω_1 レーザーを照射し光子が発生するとき、ちょうど同時刻にビームスプリッター4dに到達するように組まれている。ビームスプリッター4dでは、両側から入射した光が混ざり合い、2つの方向に出力するように設置されている。

【0022】

ビームスプリッター4dから出力された光は、光子検出器4a、4bによって検出される。すなわち、光子検出器4aが検出する光子は、ビームスプリッター4dにより混ぜられ光子検出器4aの方に出力された光子である。いま、A(1)へのレーザー照射により発生した光子の消滅演算子を $a(1)$ 、A(2)へのレーザー照射により発生した光子の消滅演算子を $a(2)$ とする。このとき、光子検出器4aの方へ向かう光子の消滅演算子 a_+ は、次のように表現される。

$$a_+ = 2 - 1/2 \{ a(1) + e^{i\phi} a(2) \} \quad (2)$$

ここで、 ϕ はA(1)とA(2)とからの光の位相シフトの差を示している。

【0023】

従って、光子検出器4aで光子を検出した場合、検出後の状態は、式(1)で

表される光子検出前の状態に、光子検出器4aへ向かう光子が消滅したことを表す演算子 a_+ を作用させれば得られる。すなわち、次の(3)の様に表現される。

$$\begin{aligned} |\Psi_\phi\rangle_+ &= a_+ |\psi\rangle \\ &= 2^{-1/2} \{S(1)^\dagger + e^{i\phi} S(2)^\dagger\} |0_a(1)\rangle |0_a(2)\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $S(1)$ 、 $S(2)$ 、 $|0_a(1)\rangle$ 、 $|0_a(2)\rangle$ の(1)、(2)は、それぞれ $A(1)$ 、 $A(2)$ に対する S 及び $|0_a\rangle$ であることを示す。

【0024】

同様に、光子検出器4bで光子を検出した場合、当該光子検出器4bへ向かう光子の消滅演算子は、次の式(4)の様に表現される。

【0025】

$$a_- = 2^{-1/2} \{a(1) - e^{i\phi} a(2)\} \quad (4)$$

従って、光子検出器4bで光子を検出した場合、検出後の状態は、次の式(5)によって表される。

【0026】

$$\begin{aligned} |\Psi_\phi\rangle_- &= a_- |\psi\rangle \\ &= 2^{-1/2} \{S(1)^\dagger - e^{i\phi} S(2)^\dagger\} |0_a(1)\rangle |0_a(2)\rangle \end{aligned} \quad (5)$$

これら(3)、(5)に示す状態 $|\Psi_\phi\rangle_-$ 、 $|\Psi_\phi\rangle_+$ では、 $|0_a(1)\rangle$ と $|0_a(2)\rangle$ との間、すなわち $A(1)$ と $A(2)$ との間にエンタングルメントが生成されている。

【0027】

以下、光子検出器4aで光子が検出された場合について説明する。 $A(1)$ と $A(n)$ との間にエンタングルメントを生成するものとする。 $|\Psi_\phi\rangle_+$ で表される状態は、ノイズのある場合には次の様に表される。

$$\begin{aligned} \rho(1, 2)(c_0, \phi) &= \{1/(c_0 + 1)\} (c_0 |0_a(1)\rangle |0_a(2)\rangle \langle 0_a(2)| \langle 0_a(1)| + |\Psi_\phi\rangle_+ \langle \Psi_\phi|) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 c_0 は、光子検出器 4 b のダークカウントの頻度により決まる値である。

【0028】

次に、A (3) と A (4) との間にも、同様のエンタングルメントを生成する。すると、A (1)、A (2)、A (3)、A (4) からなる物理系は、式 (6) を利用して、次の様に表すことが出来る。

【0029】

【数2】

$$\rho (1, 2) (c_0, \phi_1) \otimes \rho (3, 4) (c_0, \phi_2)$$

【0030】

次に、A (2) と A (3) とに、状態 $|2\rangle$ と状態 $|3\rangle$ との間の遷移に対して近共鳴の角周波数 ω_2 (図2参照) を持つレーザーを照射する。図5に示すように、この照射により A (2) と A (3) とから放出される各光子を、ビームスプリッター 5 a のそれぞれ異なる面から入射させ、混合させる。光子検出器 5 b 又は光子検出器 5 c のどちらかが光子を検出した場合には、A (1) と A (4) との間に新たなエンタングルメントが生成される。この新たなエンタングルメント生成は、光子が原子集団の量子状態に関する情報を運び、その光子を介して $S_{\pm}^{\dagger} S_{\pm}$ に相当する量を観測したことに対応する。 S_{\pm} は、次の式 (7) で表現される。

$$S_{\pm} = 2 - 1/2 \{ S (2) \pm S (3) \} \quad (7)$$

ここで、A (1) と A (4) との間のエンタングルメントの位相項は、 $\phi_1 + \phi_2$ となる。

【0031】

いま、 $n = 2^r$ (r は 2 以上の整数) 個の原子集団 $A (i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) があるとする。これらの原子集団に対して、第1段階として、上記 ω_1 の光を照射する方法で $A (2 \times k - 1)$ と $A (2 \times k)$ との間 (ただし、 $k = 1, 2, 3, \dots, n/2$) にエンタングルメントを生成する。次に、第2段階として、上記 ω_2 の光を照射する方法で、 $A (4 \times m - 2)$ と $A (4 \times m -$

1)との間（ただし、 $m = 1, 2, 3, \dots, n/4$ ）にエンタングルメントを生成する。続いて、第3段階以降は、 ω_2 の光を照射する方法を繰り返し、第 q 段階では、 $A(2^q \times (m_q - 1) + 1)$ と $A(2^q \times m_q)$ との間（ただし、 $m_q = 1, 2, 3, \dots, n/2^q$ ）にエンタングルメントを生成することができる。

【0032】

従って、 $A(2 \times k - 1)$ と $A(2 \times k)$ との間の距離（ $k = 1, 2, 3, \dots, n/2$ ）を L とし、 $A(2 \times 1)$ と $A(2 \times 1 + 1)$ との間の距離は近接していると仮定すると、第 q 段階では、図6に示すように、距離として $2^q - 1$ L 離れた原子集団間でエンタングルメントを生成することができる。

【0033】

このDuan達の方法を実現し実用化するためには、上述した各操作を高速に行う必要がある。これは、例えば次の二つの理由による。

【0034】

第1に、上述した各操作は、原子集団のコヒーレンシーが失われる前に行わなければならぬからである。すなわち、当該方法では、各段階において、異なる組み合わせの原子集団に光を照射し、そこから発生する光子をビームスプリッターで合わせる必要がある。また、各原子集団に光を照射した場合に発生する光子を、原子集団を透過してきた照射光や余計な散乱光から分離しなければならない。さらに、この分離すべき光子の角周波数（波長）は、第1段階と第2段階以降とでは異なる。これらの操作は、原子集団のコヒーレンシーが保たれている時間（デコヒーレンス時間）内に実行しなければ、空間的に離れた二つの物理系に対して、エンタングルメントを生成させることができない（言い換えれば、量子情報通信ができる距離は、デコヒーレンス時間内に、どれくらい上記の操作ができるかに依存する。）。

【0035】

一般に、デコヒーレンス時間は、長いと考えられている原子気体の核スピンの準位を利用した場合でも1m s程度である。素子化に向いている固体材料では、He温度に冷やした場合でもさらに短いと考えられている。従って、上述した各

操作の高速化は、装置実現のための具体的課題である。

【0036】

第2に、いかに早くエンタングルメントを生成できるかが、単位時間あたりに送信できる情報量を決めるからである。すなわち、エンタングルメントを利用した情報通信では、送信側と受信側の間でエンタングルメントを生成し、その量子相関を利用して情報を送るが、1回のエンタングルメント生成で送信できる情報は限られている(1ビット程度)。従って、情報通信の観点からは、エンタングルメントの生成のみが問題ではなく、その回数が量子情報通信の実用化における具体的課題である。

【0037】

本実施形態に係る量子情報通信方法は、これらの具体的課題を解決し得るものである。本生成方法は、上述したDuan達による多段のエンタングルメント結合を、光学系の組替え、位置の移動、あるいは素子の機械的動作を伴わない手法により実現するものである。具体的には、作動部を持たない受動素子と、能動素子ではあっても機械的作動部のない電気光学効果素子のような超高速動作可能な素子、及び高速のパルス列を発生することが可能なレーザー光源のみを用いて実行できる構成となっている。以下、図面を参照しながら詳細を説明する。

【0038】

なお、本実施形態では、基底状態から見てエネルギー準位の低い順番に $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ の3つの状態を持つ物理系の集団を想定している。また、各集団において、 $|1\rangle$ と $|3\rangle$ との間及び $|2\rangle$ と $|3\rangle$ との間は、光学的に遷移可能であり、 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ との間は、光学的遷移が実質的に不可能であるとする。このような集団A(i)をn個用意し($i = 1, 2, 3, \dots, n$)、図1に示すようにiの昇順に並んでいるとする。以下、A(1)とA(n)との間にエンタングルメントを生成する場合を例に、本実施形態に係る量子情報通信方法について説明する。

【0039】

本実施形態に係る量子情報通信装置は、角周波数 ω_1 又は ω_2 の光を照射するための光学系と、A(1)～A(n)の物理系の集団と、上記第1段階を行う第

1層と、第2段階を実行する第2層と、・・・、第q段階を行う第q層との各層とを具備している。上述した様に、第1層では、角周波数 ω_1 のレーザーが各物理系の集団に照射される。また、第2層及びこれより下層においては、 ω_2 のレーザーが所定の物理系の集団に照射される。従って、第2層より後段の各層は、基本的に第2層と同様の構成を有する。以下、説明を解りやすくする観点から、第1層及び第2層の構成を中心に説明する。

【0040】

図7は、本量子情報通信装置の光学系、物理系の集団A (i) (ただし、i = 1 ~ nの整数)、第1層、第2層の概略構成を説明するための図である。同図に示すように、光学系は、図示していない光源と、高速光シャッターS1 (i) (ただし、i = 1 ~ nの整数)とを有している。

【0041】

速光シャッターS1 (i)は、電気光電効果素子等から構成され、光源からの光に基づいて中心角周波数が ω_1 又は ω_2 の光パルス列を物理系の集団に照射する。

【0042】

物理系の集団A (i)は、n = 2^r (rは2以上の整数)個設けられている。各物理系の集団A (i)は、セルの中の気体、結晶中に分散させたイオン、光ファイバー中に分散させたイオンや原子、光導波路近傍に保持され、光導波路中を伝播する光のエバネッセント場と相互作用する気体や固体、液体材料などから構成される原子集団である。このA (i)は、光と相互作用可能な系であれば、どのような形態でもよい。

【0043】

第1層は、角周波数選択用フィルターF1 (i) (ただし、i = 1 ~ nの整数)、ビームスプリッターB1 (1) ~ B1 (n/2) (ただし、n = 2^r。rは2以上の整数。)、偏光ビームスプリッターT (j) (ただし、j = 2 ~ n - 1の整数)、光子検出器D1 (i) (ただし、i = 1 ~ nの整数)を有している。

【0044】

角周波数選択用フィルターF1 (i) (図7では、F1 (1) ~ F1 (4)を

図示している。) は、原子集団A (i) を透過してきた中心角周波数 ω_1 の光、及びその他の余計な散乱光と原子集団A (i) からのストークス前方散乱光とを区別するため、ストークス前方散乱光が進む光路上に、設置されている。この角周波数選択用フィルターF1 (i) は、中心角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ の光は選択的に透過し、そのうちF1 (j) (ただし、 $j = 2 \sim n - 1$ の整数) は、中心角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ の光は選択的に透過するが、後述する第2層以下の中心角周波数 $\omega_2 + \omega_{12}$ の光は反射する特性を持つ。角周波数選択用フィルターF1 (i) としては、干渉フィルター、光共振器などが利用できる。

【0045】

ビームスプリッターB1 (k) (ただし $k = 1, 2, 3, \dots, n/2$) (図7では、B1 (1)、B1 (2) を図示している。) は、それぞれの面から同時に入射した光を混合し、それぞれ反対側の面から光子検出器に向けて出射する。

【0046】

偏光ビームスプリッターT (j) (図7では、T (2)、T (3)、T (4) を図示している。) は、原子集団A (j) と角周波数選択用フィルターF1 (j)との間に挿入される。この偏光ビームスプリッターT (j) は、A (j) で発生した角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ の光子および $\omega_2 + \omega_{12}$ の光子の偏光に対して、それを透過する向きに設置されている。言い換えれば、原子集団A (j) にて発生した中心角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ 及び $\omega_2 + \omega_{12}$ の光子は、T (j) を透過するような偏光にて照射される。

【0047】

光子検出器D1 (i) (図7では、D1 (1) ~ D1 (4) を図示している。) は、ビームスプリッターによって混合された光(光子)を検出する。

【0048】

第2層は、ビームスプリッターB2 (m) (ただし、 $m = 1 \sim n/2^2$ の整数)、光子検出器D2 (4×m-2)、D2 (4×m-1) を有している。

【0049】

ビームスプリッターB2 (m) (図7では第1層のB2 (m) としては、B2 (

1) を図示している。) は、両面から同時に入射した中心角周波数 $\omega_2 + \omega_{12}$ の光を混合し、それぞれ反対側の面から光子検出器に向けて出射する。この両面からの中心角周波数 $\omega_1 + \omega_{12}$ の光の入射タイミングは、第1層の場合と同様、角周波数 ω_2 の光パルス列の照射タイミング、及びビームスプリッター B2 (m) までの光路長により調節される。

【0050】

次に、本量子情報通信装置の動作について説明する。まず、各原子集団 A (i) に対して、冷却、又は所定の光照射により、種々の準位にある原子の状態を、励起状態を介して状態 | 1 > に遷移させる。

【0051】

このように各原子を、状態 | 1 > に遷移させた後、第1層による、原子集団 A (2 × k - 1) と A (2 × k) との間のエンタングルメントの生成を行う。各原子集団 A (i) に対して、高速シャッター S1 (i) を通して、中心角周波数 ω_1 の光パルス列を照射する。この照射を高速に実現するためには、例えば、 ω_1 のパルス列を絶えず高速光シャッター S1 (i) に入射させ、当該高速光シャッター S1 (i) の開閉により照射の有無を制御する方法を採用することができる。また、制御時間に余裕のある場合には、他の方法として、図示していないレーザー光源等の ON、OFF 制御により、光パルス列照射の有無を制御してもよい。後者の場合には、高速シャッター S1 (i) は、光源そのものに組み込まれる構成となる。

【0052】

この照射は、隣り合う集団 (図 7 では、A (1) と A (2)、A (3) と A (4)) が発生する光子を第1層における各ビームスプリッター (図 7 では、B1 (1)、B1 (2)) にて重ね合わせての観測する際、それぞれの原子集団から発生した光子が各ビームスプリッターに同時に到達するようなタイミングで実行される。また、この中心角周波数 ω_1 の光パルス列のパルス幅は、1 回のパルス照射で、それぞれの原子集団から発生する平均光子数が 1 より十分小さくなるように調整される。なお、光子のモードと原子集団との結合を増強するために、各集団 A (i) を共振器中に設置する構成であってもよい。

【0053】

中心角周波数 ω_1 の光パルスが各原子集団A (i) に照射されると、ラマン散乱（光散乱）

が起こる。このときのラマン遷移によってストークス前方散乱光（照射した光パルスと同じ方向に発生する長波長側にシフトした散乱光）が発生する。このストークス前方散乱光の角周波数は、 $\omega_1 - \omega_{12}$ となる。ここで、 ω_{12} とは、状態 $|1\rangle$ から状態 $|2\rangle$ への遷移角周波数である（同様に、 ω_{13} を状態 $|1\rangle$ から状態 $|3\rangle$ への遷移角周波数、 ω_{23} を状態 $|2\rangle$ から状態 $|3\rangle$ への遷移角周波数と定義する。）。

【0054】

次に、A (j) ($j = 2, 3, \dots, n-1$) で発生したストークス前方散乱光を含む光が、偏光ビームスプリッターT (j) に入射する。偏光ビームスプリッターT (j) は、中心角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ の光と中心角周波数 $\omega_2 + \omega_{12}$ の光との偏光に対応した向きに設置されている。従って、偏光ビームスプリッターT (j) は、中心角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ の光と $\omega_2 + \omega_{12}$ 光を透過させる。

【0055】

偏光ビームスプリッターT (j) を透過した光は、偏光子P1 (j) を透過し、角周波数選択用のフィルターF1 (j) に入射する。角周波数選択用のフィルターF1 (j) では、原子集団A (j) を透過してきた中心角周波数 ω_1 の光、及びその他の余計な散乱光とストークス前方散乱光とが区別される。その結果、中心角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ の光のみ偏光ビームスプリッターB1 (k) に入射する。

【0056】

またA (1) とA (n) で発生した光子はF1 (1) とF1 (n) で中心角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ の光子が分離されて、それぞれビームスプリッターB1 (1) 、B1 (n) に入射する。

【0057】

ビームスプリッターB1 (k) は、両面から同時に入射した中心角周波数 ω_1

$-\omega_1$ 2 の光を混合し、それぞれ反対側の面から光子検出器に向けて出射する。この両面からの中心角周波数 $\omega_1 - \omega_1$ 2 の光の入射タイミングは、角周波数 ω_1 の光パルス列の照射タイミング、及びビームスプリッター B1 (k) までの光路長により調節することができる。

【0058】

ビームスプリッター B1 (k) によって混合された光を、光子検出器 D1 (2 \times k - 1) と光子検出器 D1 (2 \times k) とのどちらかが検出すると、当該検出と連動して高速光シャッター S1 (2 \times k - 1) と S1 (2 \times k) とを速やかに閉じる。この光子検出と連動した光シャッターの閉鎖は、それぞれの光子検出器 D1 (2 \times k - 1) と光子検出器 D1 (2 \times k) とを、高速光シャッター S1 (2 \times k - 1) と S1 (2 \times k) とに付属して設置された信号処理回路によって、自動的に行なわれる。この光シャッター S1 (2 \times k - 1) と S1 (2 \times k) との閉鎖により、その検出された光子発生に寄与した光パルスの次の光パルスは、A (2 \times k - 1) と A (2 \times k) とに照射されない。

【0059】

光子検出器 D1 (2 \times k - 1) と光子検出器 D1 (2 \times k) とのどちらかによる光子の検出と、光シャッター S1 (2 \times k - 1) と S1 (2 \times k) との閉鎖とが、 $k = 1, 2, \dots, n/2$ の全ての組に対して完了すると、隣り合う全ての A (2 \times k - 1) と A (2 \times k) との間で、エンタングルメントを生成させることができる。

【0060】

以上の隣り合う A (2 \times k - 1) と A (2 \times k) との間のエンタングルメント生成は、第1層によって実行される。この第1層でのエンタングルメント生成を効率的にする観点から、隣り合う全ての A (2 \times k - 1) 、 A (2 \times k) への光照射、光子検出器 D1 (2 \times k - 1) 、光子検出器 D1 (2 \times k) による光子検出、及び高速光シャッター S1 (2 \times k - 1) 、 S1 (2 \times k) の閉鎖は、 $k = 1, 2, \dots, n/2$ の全ての組に対して平行して行なわれるのが望ましい。

【0061】

次に、第2層による、原子集団 A (4 \times m - 2) と A (4 \times m - 1) との間の

エンタングルメントの生成を行う。すなわち、まず、各原子集団A ($4 \times m - 2$)、A ($4 \times m - 1$) に対して、高速シャッターS1 ($4 \times m - 2$)、S1 ($4 \times m - 1$) を通して、中心角周波数 ω_2 の光パルス列を照射する。

【0062】

中心角周波数 ω_2 の光パルスが各原子集団A ($4 \times m - 2$)、A ($4 \times m - 1$) に照射されると、ラマン散乱（光散乱）が起こる。

【0063】

次に、中心角周波数 $\omega_2 + \omega_1$ の光子を含む光が、偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) に入射する。偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) は、中心角周波数中心角周波数 $\omega_2 + \omega_1$ の光を透過させる。

【0064】

次に、偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) を透過した光は、後段に設置された偏光子P1 ($4 \times m - 2$)、P1 ($4 \times m - 1$) に入射する。原子集団A ($4 \times m - 2$)、A ($4 \times m - 1$) で発生し偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) に入射する中心角周波数 $\omega_2 + \omega_1$ の光子の偏光方向は、偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) に対して透過する向きであるP偏光になるように設定されている。

【0065】

偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) を透過した中心角周波数 $\omega_2 + \omega_1$ の光子は、角周波数選択用フィルターF1 ($4 \times m - 2$)、F1 ($4 \times m - 1$) に向かう途中と、当該角周波数選択用フィルターF1 ($4 \times m - 2$)、F1 ($4 \times m - 1$) で反射され偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) まで戻る途中とで偏光子P1 (i) の作用を受ける。従って全体の作用として、それぞれ偏光子P1 ($4 \times m - 2$)、P1 ($4 \times m - 1$) から偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) に向かう際には、中心角周波数 $\omega_2 + \omega_1$ の光子の偏光が、偏光ビームスプリッターT ($4 \times m - 2$)、T ($4 \times m - 1$) に対して反射される偏光になるようにしてある。

【0066】

偏光子P1（ $4 \times m - 2$ ）、P1（ $4 \times m - 1$ ）としては。 $\lambda/4$ 板を利用することができる。その場合、その軸の向きは、偏光ビームスプリッターT（ $4 \times m - 2$ ）、T（ $4 \times m - 1$ ）を透過してきた偏光の方向に対して45度に設定されている。従って、偏光ビームスプリッターT（ $4 \times m - 2$ ）、T（ $4 \times m - 1$ ）を透過してきた中心角周波数 $\omega_2 + \omega_{12}$ の光の偏光は、それぞれ偏光子P1（ $4 \times m - 2$ ）、P1（ $4 \times m - 1$ ）を通過して角周波数選択用フィルターF1（ $4 \times m - 2$ ）、F1（ $4 \times m - 1$ ）で反射され、再び偏光子P1（ $4 \times m - 2$ ）、P1（ $4 \times m - 1$ ）を通過し、これにより90度回転する。

【0067】

偏光子P1（ $4 \times m - 2$ ）、P1（ $4 \times m - 1$ ）を通過し再び当該偏光子P1（ $4 \times m - 2$ ）、P1（ $4 \times m - 1$ ）側から偏光ビームスプリッターT（ $4 \times m - 2$ ）、T（ $4 \times m - 1$ ）に入射する光は、偏光ビームスプリッターT（ $4 \times m - 2$ ）、T（ $4 \times m - 1$ ）に対してS偏光になっているため、偏光ビームスプリッターT（ $4 \times m - 2$ ）、T（ $4 \times m - 1$ ）で反射される。この偏光ビームスプリッターT（ $4 \times m - 2$ ）、T（ $4 \times m - 1$ ）によって反射された光は、角周波数選択用のフィルターF2（ $4 \times m - 2$ ）、F2（ $4 \times m - 1$ ）に入射する。角周波数選択用のフィルターF2（ $4 \times m - 2$ ）、F2（ $4 \times m - 1$ ）は、角周波数 ω_2 の光等の余計な光を取り除き、中心角周波数 $\omega_2 + \omega_{12}$ の光のみを取りだす。

【0068】

この様な構成をとることにより、原子集団A（i）からみて角周波数選択用フィルターF1（i）より先へは、中心角周波数 ω_1 の光パルスを原子集団A（i）に照射する際に生じる中心角周波数 $\omega_1 - \omega_{12}$ の光子のみが進むようになることができる。一方、原子集団A（j）からみて角周波数選択用フィルターF2（j）より先へは、中心角周波数 ω_2 の光パルスを原子集団A（j）に照射する際に生じる中心角周波数 $\omega_2 + \omega_{12}$ の光子のみが、偏光ビームスプリッターB2（k）へ進むようになることができる。

【0069】

ビームスプリッターB2 (m) は、両面から同時に入射した中心角周波数 $\omega_2 + \omega_1 2$ の光を混合し、それぞれ反対側の面から光子検出器に向けて出射する。この両面からの中心角周波数 $\omega_1 + \omega_1 2$ の光の入射タイミングは、第1層の場合と同様、角周波数 ω_2 の光パルス列の照射タイミング、及びビームスプリッタ-B2 (m) までの光路長により調節することができる。

【0070】

ビームスプリッターB2 (m) によって混合された光を、光子検出器D2 ($4 \times m - 2$) と光子検出器D2 ($4 \times m - 1$) とのどちらかが光子を検出すると、当該検出と連動して高速光シャッターS1 ($4 \times m - 2$) とS1 ($4 \times m - 1$) とを速やかに閉じる。こうして、光子検出器D2 ($4 \times m - 2$) と光子検出器D2 ($4 \times m - 1$) とのどちらかによる光子の検出と、高速光シャッターS1 ($4 \times m - 2$) とS1 ($4 \times m - 1$) との閉鎖とが、 $m = 1, 2, \dots, n/4$ の全ての組に対して完了すると、A ($4 \times m - 2$) とA ($4 \times m - 1$) の間で、エンタングルメントを生成させることができる。

【0071】

以上のA ($4 \times m - 2$) とA ($4 \times m - 1$) の間のエンタングルメント生成は、第2層によって実行される。この第2層でのエンタングルメント生成を効率的にする観点から、第1層の場合と同様、全てのA ($\times m - 2$) 、A ($4 \times m - 1$) への光照射、D2 ($4 \times m - 2$) とD2 ($4 \times m - 1$) とによる光子検出、及び高速光シャッターS1 ($4 \times m - 2$) 、S1 ($4 \times m - 1$) の閉鎖は、 $m = 1, 2, \dots, n/4$ の全ての組に対して平行して行なわれるのが望ましい。

【0072】

第3層以降は、第2層と同様の操作を繰り返す。一般に、第q層であれば、高速シャッターS1 ($2^q \times m_q - 2^q - 1$) 、S1 ($2^q \times m_q - 2^q - 1 + 1$) を開き、中心角周波数 ω_2 の光を原子集団A ($2^q \times m_q - 2^q - 1$) とA ($2^q \times m_q - 2^q - 1 + 1$) に照射する（ただし、 $m_q = 1, 2, 3, \dots, n/2^q$ ）。そして、光子検出器D2 ($2^q \times m_q - 2^q - 1$) 、D2 ($2^q \times m_q - 2^q - 1 + 1$) のどちらかが光子を検出したら、その検出と連動して、高速光シャッターS1 ($2^q \times m_q - 2^q - 1$) 、S1 ($2^q \times m_q - 2^q - 1 + 1$

) を速やかに閉じる。これにより、光子検出後に、その検出された光子発生に寄与した光パルスの次の光パルスからは、原子集団A ($2^q \times m_q - 2^q - 1$) とA ($2^q \times m_q - 2^q - 1 + 1$) に照射されないようにする。その結果A ($2^q \times (m_q - 1) + 1$) とA ($2^q \times m_q$)との間にエンタングルメントが生成する。この操作を、第r段階 (ただし、 $r = \log_2 n$) まで実行することで、A (1) とA (n)との間にエンタングルメントを生成することができる。

【0073】

以上述べた構成によれば、以下の効果を得ることができる。まず、本実施形態では、光子検出器による光子検出に連動して高速光シャッターを開閉するだけでも、空間的に離れた物理的集団の間にエンタングルメントを生成することができる。すなわち、作動部を持たない受動素子と、能動素子ではあっても機械的作動部のない電気光学効果素子のような超高速動作可能な素子、および高速のパルス列を発生することが可能なレーザー光源、あるいは連続発振のレーザー光源のみを用いて実行できる。従って、物理系の集団のデコヒーレンス時間内に多段のエンタングルメント結合を生成することができ、その結果、空間的に離れた物理的集団の間にエンタングルメントを生成することができる装置および方法を提供することができる。

【0074】

例えば、原子集団A (i) が直線状に並び、A ($2 \times k - 1$) とA ($2 \times k$) の間の距離がLであり、A ($2 \times k$) とA ($2 \times k + 1$) とが隣接している場合に、第r段階までこのエンタングルメント結合を繰り返すものとする。この場合、 $2^{r-1} \times L$ 離れて設けられた原子集団の間でエンタングルメントが生成できる。その結果、この距離間でエンタングルメントを利用した量子暗号、量子テレポーテーションなどの量子情報通信を実現することができる。

【0075】

また、エンタングルメントの生成途中で失敗した場合でも、光速の光シャッターの開閉のみで速やかにエンタングルメントの生成操作をやり直すことが可能である。

【0076】

さらに、本実施形態では、第1段階の光パルスの中心角周波数 ω_1 と第2段階以降の光パルスの中心角周波数 ω_2 とし、両方とも $|2\rangle - |3\rangle$ 間の遷移に近共鳴の角周波数 ω_2 を利用することで、各物理系の集団にコヒーレントな光パルス列を照射する光源を、一種類のレーザーとすることが可能である。その場合、それぞれのレーザー光源自体は絶えず光パルス列を放出しつづけていればよく、レーザーの切り替え操作以外の、検出器による光子検出に連動したシャッターの開閉のみで、エンタングルメントを次々に生成することができる。従って、比較的簡易且つ低コストにて、量子情報通信装置を実現することができる。

【0077】

次に、本量子情報通信装置、量子情報通信の方法の複数の実施例について説明する。以下の各実施例では、説明を具体的にするため、原子集団をA(1)～A(4)の4つとし、A(1)とA(4)との間にエンタングルメントを生成する場合について、図8～図14を参照しながら説明する。

【0078】

なお、原子集団A(1)～A(4)は、図8、図10においてはそれぞれ結晶5～8、図12においてはガスセル3801～3804、図13においては一部にPrをドープした光ファイバー5601～5604に対応する。また、後述する第2の実施形態は、各実施例に係る量子情報通信装置、量子情報通信の方法にも適用することができる。

【0079】

(実施例1)

まず、Pr³⁺イオンを0.02%分散させた2mm×2mm×2mmのY₂SiO₅結晶を4個用意する。この結晶を光学窓付きクライオスタット中に保持し、温度を1.4Kに保つ。

【0080】

また、605.98nm(16502.3cm⁻¹)近辺に角周波数 ω_2 を合わせた周波数を安定化させたリング色素レーザー光源と、当該レーザーから 9.4×10^{13} rad/s(約500cm⁻¹)だけ小さい角周波数 $\omega_1 = \omega_2 - 9.4 \times 10^{13}$ rad/sの光を出す別の周波数を安定化したリング色素レー

ザー光源を用意する。前者のリング色素レーザー光源は、結晶中の P_{r}^{3+} の最低のシユタルク準位 3H_4 (1) と電子励起状態である 1D_2 (1)との間の遷移に共鳴するものである。

【0081】

実施例1では、図8に示した装置により各レーザーを原子集団A (i)としての結晶5～8に照射し、発生した光子を検出することで、エンタングルメントを生成する。

【0082】

すなわち、図8に示すように、光学窓付きクライオスタット1～4の中に設置した結晶5～8を並べ、全ての結晶にリング色素レーザー光源9からの角周波数 ω_1 の光を照射可能とし、結晶6, 7に関しては、リング色素レーザー光源10からの角周波数 ω_2 とリング色素レーザー光源9とからの角周波数 ω_1 の光の両方が照射できるように光学系を組む。

【0083】

リング色素レーザー光源9からの出力は、まず出力光の角周波数を掃引するための電気光学効果素子401を透過し、次に透過率50%、反射率50%のビームスプリッター201で分岐する。分岐の片方は、角周波数を $17.3 \times 2\pi MHz$ だけ低エネルギー側へシフトさせるための音響光学効果素子301を通過し、さらに光パルスを形成する電気光学効果素子402を通し、半透鏡501で角周波数シフト前の光の光路と合流するようにしてある。合流前のもう片方の光路にも、光をパルスに整形するための電気光学効果素子403が挿入されている。この部分は、結晶のエネルギー状態を、 $17.3 \times 2\pi MHz$ 隔てた2状態のうちの低い方に初期化するために利用する。

【0084】

初期化の場合以外は、リング色素レーザー光源9からの出力のうちのビームスプリッター201を透過した角周波数 ω_1 のレーザーは、電気光学効果素子（シャッター）403を通過する。この電気光学効果素子403は、ビームスプリッター201を透過した角周波数 ω_1 のレーザーを光パルス列にし、また、リング色素レーザー光源10に切り替える際にシャッターとして利用される。角周波数

ω_1 の光パルス列は、50%透過、50%反射のビームスプリッター202で2つに分けられた後、さらにそれぞれ50%透過、50%反射のビームスプリッタ-203、204で分岐される。

【0085】

分岐されたそれぞれの光パルスは、ミラー601～604および半透鏡502、503に導かれ、それぞれの結晶に照射される前に、音響光学効果素子（音響光学効果を利用した光シャッター）302～305を通り、さらに偏光方向を調整する $\lambda/2$ 板701～704を通過した後、結晶5～8に入射する。

【0086】

光パルスを照射された結晶5、8が照射光と同じ方向、向きに放出する各光は、それぞれ $\lambda/2$ 板705、708を通り、次いでファブリ・ペロー型の光共振器801、804を通る。光共振器801、804は、 $\omega_1 - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光に共鳴するように調整され、 $\omega_1 - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子は透過させる。また ω_1 、 ω_2 、 $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ 、 $\omega_2 - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光には共鳴せず、反射する。

【0087】

結晶6、7から放出される光子は、偏光を調整する $\lambda/2$ 板706、707を通り、次いで偏光ビームスプリッター901、902を透過し、さらに $\lambda/4$ 板1001、1002を透過して、光共振器802、803に入射される。光共振器802、803の光学特性は、光共振器801、804と同じである。結晶6、7から照射光と同じ方向、向きに放出する $\omega_1 - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子、あるいは ω_2 の光を入射した場合に発生する $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子の偏光方向が、偏光ビームスプリッターを透過する方向になるように、 $\lambda/2$ 板706、707は調整されている。偏光ビームスプリッター901、902、次いで $\lambda/4$ 板1001、1002、そして光共振器802、803を透過した $\omega_1 - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子は、再び $\lambda/4$ 板1003、1004を通り、直線偏光でなくなっていた場合でも、直線偏光にもどされる。

【0088】

光共振器801、802を透過した $\omega_1 - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子は、ビ

ームスプリッター206で重ね合わされ、光子検出器1101、1102で検出される。その際、 $\lambda/2$ 板705で、ビームスプリッターで重ね合わされる光子の偏光方向が一致するように調整されている。また、光共振器803、804を透過した $\omega_1 - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子は、ビームスプリッター207で重ね合わされ、光子検出器1103、1104で検出される。その際、 $\lambda/2$ 板708で、ビームスプリッターで重ね合わされる光子の偏光方向が一致するように調整されている。

【0089】

リング色素レーザー光源10からの出力は、照射するレーザーを光パルス列にするためと、結晶への照射光の角周波数切り替えの際にシャッターとして利用するために設けた電気光学効果を利用したシャッター404を通り、50%透過、50%反射のビームスプリッター205で2つに分けられた後、半透鏡502、503を透過する。その後は、リング色素レーザー1からの光照射の場合と同じ光路を通って結晶6、7に照射される。

【0090】

結晶6、7に ω_2 の光を入射した場合に発生する $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子は、それぞれ $\lambda/2$ 板706、707を通り、偏光ビームスプリッター901、902を透過した後、 $\lambda/4$ 板1001、1002を透過し、光共振器802、803で反射される。反射された光子は再び $\lambda/4$ 板1001、1002を逆側から透過するが、その際、最初に $\lambda/4$ 板を透過した時と偏光方向が90度回転するように偏光子の軸が調整されているため、共振器から反射された $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子は、偏光ビームスプリッター901、902で反射され、偏光方向を $\lambda/2$ 板709、710で調整された後、光共振器805、806へと導かれる。

【0091】

光共振器805、806は $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光に共鳴するように調整され、 $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光子は透過させる。また、光共振器805、806は、 ω_1 、 ω_2 あるいは $\omega_2 - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ の光には共鳴せず、反射する。光共振器805、806を透過した $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$

zの光子は、ビームスプリッター208で重ね合わされ、光子検出器1105、1106で検出される。

【0092】

以上の光学系において、リング色素レーザーを結晶に照射した際生じる光子をビームスプリッターで重ねあわせる際、発生した光子がビームスプリッターで出会うように、照射光パルスのタイミングと光路長とを調整する。

【0093】

また、結晶に照射する光パルスの強度およびパルス幅は、 ω_1 の光を照射する際には、光照射によって照射光と同じ方向、向きに放出される光子の平均光子数が1より十分小さくなる程度に調整する。

【0094】

光子検出器1101～1106としては、6Kに冷却したアバランシェ・フォトダイオードを利用する。光子検出器1101、1102からの出力、光子検出器1103、1104からの出力、光子検出器1105、1106からの出力はそれぞれ、信号処理回路1201、1202、1203に送られる。信号処理回路1201は、接続された2つの光子検出器からの入力、光子検出信号1301、1302のどちらか片方からの光子検出信号を受けると、すぐに音響光学素子ドライバー1402に、シャッターを閉めるための制御信号1501、1502を送る。また、信号処理回路1202は、接続された2つの光子検出器からの入力、光子検出信号1303、1304のどちらか片方からの光子検出信号を受けると、すぐに音響光学素子ドライバー1403、1404に、シャッターを閉めるための制御信号1503、1504を送り、それぞれ音響光学効果素子302、303および音響光学効果素子304、305が閉められるようになっている。また、信号処理回路1203は、接続された光子検出器1105、1106のどちらか片方からの光子検出信号1305、1306を受けるとすぐ、音響光学素子ドライバー1402、1403にシャッターを閉めるための制御信号1505、1506を送り、光シャッター303、304が閉められるようになっている。

【0095】

さらに、電気光学効果素子401～404のドライバ1601～1604、および信号処理回路1201～1203は、全体を制御するための制御回路1701に接続され、リング色素レーザー光源9および10からの出力のon/offや、パルス光生成およびそのタイミング制御、さらに信号処理回路を初期化して、音響光学効果素子302～305の全部または一部を開くなどの動作、あるいは結晶に特定の状態の光を照射して初期化するなどの動作を、光シャッターのいずれが閉じられているかなどの条件を入力信号として読みとりつつ、予め設定されたプログラムに従って実行することが可能になっている。

【0096】

以上のように組んだ光学系および光シャッター等光学素子の制御系において、次に示す動作を実行させる。

【0097】

まず、電気光学効果素子402、403に関しては光パルスを生成するように開閉しながら、電気光学効果素子404を閉じた状態で、音響光学効果素子302～305を開き、リング色素レーザー光源9からの光を電気光学効果素子401で周波数シフトさせる。シフト後の角周波数を ω_A とすれば、そのあと音響光学効果素子301を通した光（角周波数 $\omega_A - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ ）と通さない光（角周波数 ω_A ）の2波長光にしたものを、結晶5～8に照射する。その際、電気光学効果素子402および403で生成した2種類の光パルスの波形は、パルス幅が等しく、どちらも滑らかな裾を引く山型になるよう整形する。

【0098】

また、結晶に照射されるパルス光のタイミングを、 ω_A のパルスが $\omega_A - 17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ のパルスより先に照射され、かつ時間的な重なりができるように、お互いの遅延をパルスの半值半幅程度設ける。この1対の光パルスを、角周波数 ω_A を $1 \times 2\pi \text{MHz}$ ずつ変化させながら、 ω_1 を中心に、±約5GHzの範囲で照射する。こうすることで、結晶中のPr³⁺イオンで、電子基底状態の3H₄（1）準位にあったイオンは、その超微細構造準位の中で、角周波数 $17.3 \times 2\pi \text{MHz}$ に相当するエネルギーだけ離れた2準位のうちエネルギーの低い方の準位に準備される。

【0099】

上記の結晶の初期化に用いるレーザーとして、このあとに説明するエンタングルメント結合に用いるレーザーを利用する。しかしながら、別の初期化専用のレーザーを用意して結晶に光を照射し、上記の初期化を行うこともできる。特に長距離間でのエンタングルメント生成、結合を行う際には、それぞれの物理系集団の近くに初期化専用レーザーを設け、これを用いる構成であってもよい。

【0100】

次に、第1段階として、電気光学効果素子404および電気光学効果素子402を閉じた状態で、音響光学効果素子302～305を開き、また電気光学効果素子401での周波数シフトを働かさない素通しの状態で、電気光学効果素子403で角周波数 ω_1 の光パルス列を生成し、結晶5～8に照射する。その結果、各結晶5～8から生じた角周波数 $\omega_1 - 17.3 \times 2\pi \text{ MHz}$ の光子がビームスプリッターで重ね合わされ、光検出器で検出され、それに連動して音響光学効果素子302～305が次々閉まる。音響光学効果素子302～305の全てが閉まった後、制御回路1701により第2段階が始められる。すなわち、電気光学効果素子403が閉じられ、替わりに電気光学効果素子404が ω_2 の光パルス列の生成を始め、音響光学効果素子303、304が開かれ、 ω_2 の光パルスは、結晶6、7に照射される。結晶から生じた角周波数 $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{ MHz}$ の光子は、ビームスプリッター208で重ね合わされ、光検出器で検出され、それに連動して、音響光学効果素子303、304が閉じられる。

【0101】

これら一連の動作は全て自動的に、例えば約 $10\mu\text{s}$ のうちに実行される。その結果、結晶5に含まれるPr³⁺イオンの集団と、結晶8に含まれるPr³⁺イオンの集団との間にエンタングルメントを生成することができる。

【0102】

以上述べた構成によれば、空間的に離れた二つの原子集団にエンタングルメントを生成し、さらにその2組のエンタングルメントを短時間のうちに結合して、より長距離間でのエンタングルメントを生成することができる。また、本実施例に利用した光源、光学系、および制御系をあわせてエンタングルメントを生成す

る装置を構築することができる。

【0103】

上記量子情報通信装置によって、A(1)とA(4)との間にエンタングルメントが生じたことは、以下のようにして確認することができる。

【0104】

上記のようなエンタングルメント生成系を2系統構築し、エンタングルメントをその間に生じさせたPr3+イオンの集団の組を、2組用意する。その様子を図9に示し、以下では図9を用いて説明する。その一組目のPr3+イオンの集団の片方が図中のイオン集団1801でもう片方がイオン集団1802、二組目のPr3+イオンの集団の片方が図中のイオン集団1803でもう片方がイオン集団1804である。

【0105】

図9に模式的に示すように、2組のエンタングルメントで結ばれたイオン集団が生成できたら、イオン集団1801と1803およびイオン集団1802と1804に同時に ω_2 の光パルスを照射する。光パルス照射により生じる $\omega_2 + 17.3 \times 2\pi \text{ MHz}$ の光子は、その光子の角周波数に共鳴し、その光子を選択的に透過する光共振器1901～1904を透過させた後、イオン集団1803から生じた光子に関しては、位相変調器2001で ϕ_a だけ位相を変化させ、イオン集団1804から生じた光子に関しては、位相変調器2002で ϕ_b だけ位相を変化させる。

【0106】

位相変化の後、イオン集団1801と1803とから発生した光子は、ビームスプリッター2101で重ね合わされる。重ね合わせの後、2方向に進む光子のそれぞれは、光子検出器2201、2202で検出できるようになっている。また、イオン集団1802、1804から発生した光子は、ビームスプリッター2102で重ね合わされる。重ね合わされた後、2方向に進む光子のそれぞれは、光子検出器2203、2204で検出できるようになっている。

【0107】

各イオン集団に光パルスを照射し、光子検出器2201、2202のどちらか

と、光子検出器2203、2204のどちらかが同時に光子を検出する場合、どの検出器の組み合わせが同時検出をするかは、イオン集団1801と1802の間、およびイオン集団1803と1804との間にエンタングルメントが生じていれば、位相差 $\phi_a - \phi_b$ により決まる。

【0108】

すなわち、イオン集団に関する光子発生および検出について、位相変調のオフセットを適当に設定することで、 $\phi_a = \phi_b = 0$ 、又は $\phi_a = \phi_b = \pi/2$ の場合には、同時検出が起こるのはいつでも光子検出器2201と2203との組、又は光子検出器2202と2204との組とすることができ、また、 $\phi_a = 0$ 、 $\phi_b = \pi/2$ 、又は $\phi_a = \pi/2$ 、 $\phi_b = 0$ の場合は、その他の組み合わせの同時検出も起こることが観測されるならば、本実施例において、最終的にエンタングルメントが生成されると予想された2つの結晶中のイオン集団間に、実際に生成されたエンタングルメントを確認することができる。

【0109】

上記の2組のエンタングルメントで結ばれたイオン集団を、例えば次のように利用すれば、量子暗号（乱数表の共有）を実行することができる。すなわち、乱数表を共有したい2者のうち第1者は位相変調器2001で ϕ_a を0又は $\pi/2$ に設定し、また、光子検出器2201、2202での光子検出結果を知ることができるとする。一方、第2者は、位相変調器2002で ϕ_b を0又は $\pi/2$ に設定し、光子検出器2203、2204での光子検出結果を知ることができるとする。

【0110】

まず、2組のエンタングルメントで結ばれたイオン集団を生成し、第1者と第2者は、それぞれランダムにただし同じ頻度で ϕ_a と ϕ_b とを0又は $\pi/2$ に設定し、結晶への光照射により生じた光子の検出をする。その際、第1者は、光子検出器2201が検出した場合には「0」、光子検出器2201が検出した場合は「1」と記録する。また、そのとき設定されている ϕ_a の値を記録する。一方、第2者は、光子検出器2203が検出した場合は「0」、光子検出器2204が記録した場合は「1」と記録し、そのとき設定されている ϕ_b の値を記録する

【0111】

エンタングルメント生成から始まるこの作業を何度か繰り返すことにより、第1者と第2者は、数字の列を得ることができる。第1者と第2者との間で、位相設定の履歴情報を交換し、偶然 $\phi_a = \phi_b$ であった場合の数字のみを取り出せば、第1者及び第2者は、共通の乱数表を得ることができる。またこの方法は、量子力学的観点から、この乱数表に関する情報への盗聴に関して安全であることが知られている。

【0112】

以上で説明したエンタングルメント確認の系は、音響光学効果を利用した偏向器を、結晶5、8で発生し $\lambda/2$ 板705、708を通る光子の光路中、 $\lambda/2$ 板の直後に挿入することで、図9に示した光学系に組み込んでおくことが可能である。エンタングルメント生成操作後、速やかに上記操作を行うことで、実際にエンタングルメントが生成されていることを確認できる。

【0113】

(実施例2)

実施例1においては、半透鏡501から結晶5～8に照射する光のために設けられた音響光学効果素子302～305の手前までの光路と、電気光学効果素子404から音響光学効果素子303、304までの光路が、ミラーで方向を定め自由空間を伝播させることで設定されていた。これに対し、本実施例2では、光ファイバー中を伝播させるように設定して、実施例1と同様に結晶5と結晶8とのそれぞれのPr3+イオン集団間に、エンタングルメントを生成する。

【0114】

すなわち、半透鏡501を透過あるいは反射してきた光を、レンズ2601（以下図10参照）で集光して、光ファイバー2701に入射し光ファイバー中を伝播させる。また、電気光学効果素子404を透過してきた光をレンズ2602で集光し、光ファイバー2702に入射し光ファイバー中を伝播させる。実施例1ではビームスプリッターあるいは半透鏡が担っていた機能を、ファイバー光カッター2801～2806で置き換え、各結晶に対応する光シャッターの手前で

ファイバーからの出力をレンズ2603～2606で平行光に戻す。

【0115】

このように光ファイバーを利用してすることで、それぞれの結晶を離して、実用的には長距離間のエンタングルメントを生成する際、途中に障害物があっても簡単に迂回できる。また、光路設置後に、光路中に障害物が進入する可能性も少なく、またミラー等の調整もいらす保守も楽な光路を設定することができる。

【0116】

(実施例3)

実施例1においては、音響光学効果素子302～305として音響光学効果素子を利用した。これに対し、本実施例3では、音響光学効果素子302～305を、電気光学効果素子を利用したシャッターに置き換える。その結果、実施例1の場合と比較して、エンタングルメント生成系全体の動作速度が向上し、エンタングルメント結合に必要な時間をより短くすることができる。特に、結晶の初期化過程を除くエンタングルメント生成に必要な時間を1/10にすることができ、多段のエンタングルメント結合による長距離間のエンタングルメント生成に有効な構成と言える。

【0117】

(実施例4)

実施例1においては、原子集団A（i）として、クライオスタット1～4中に配置された結晶5～8を用いた。本実施例4においては、原子集団A（i）として、ガスセル中に封入したルビジウム原子を用いる。

【0118】

ルビジウム原子のエネルギー準位のうち、本実施例4にかかる準位を図11に模式的に示す。また、本実施例に用いた光路および光学素子等の配置を図12に示す。

【0119】

本実施例4では、実施例1における安定化したリング色素レーザー光源9からの光の角周波数を、ルビジウム原子の基底状態である5S_{1/2}の2つの超微細構造準位であるF=1の状態とF=2の状態のうち、エネルギーの高い方である

$F = 2$ の状態と上準位の $5P_3/2$ に共鳴する角周波数（約 780 nm に相当）に変えて使用する。また、実施例 1 における安定化したリング色素レーザー光源 10 からの光の替わりに、リングレーザー光源 9 からの光を分岐して利用する。また、波長依存性がある光学素子や光共振器をルビジウムの遷移に合わせたものに変更する。さらに、また実施例 1 における音響光学素子 301 を電気光学効果素子 3301 に替え、それによる角周波数シフト量を、 $17.3 \times 2\pi\text{ MHz}$ (Mrad/s) ではなく、 $9 \times 2\pi\text{ GHz}$ に設定する（ $9 \times 2\pi\text{ GHz}$ は、ルビジウムの基底状態の $F = 1$ 状態と $F = 2$ 状態のエネルギー差に相当する。）。初期化においては、実施例 1 では $\pm 5\text{ GHz}$ である、電気光学効果素子 401 による周波数変化の範囲を、電気光学効果素子 3302 を用いて $\pm 2\text{ GHz}$ とする。以上のようにルビジウム原子に合わせた変更をしながら、実施例 1 と同様の操作を行う。

【0120】

なお、光パルス列を作る際のパルス間隔は、ガスセルから発生する光子がビームスプリッターで重ね合わせることができるように調整される。本実施例 4 の場合、ビームスプリッター 3002～3004 およびミラー 3203 が等間隔で並び、それらビームスプリッターやミラーからガスセルまで、またガスセルから光子を重ね合わせるビームスプリッター 4201～4203 までの光路長を等しく設定している。従って、ビームスプリッター 3002～3004 の隣接するもの同士の間隔を、光パルスが進む時間がパルスの時間間隔となるように光パルス列を発生させる。

【0121】

この様な構成により、実施例 1 と同様の操作の結果、ルビジウム原子の集団 3801 と 3804 との間に、エンタングルメントを生成することができる。また、本実施例 4 では、単一の光源から得られた光を用いるだけであり、また、初期化を除いたエンタングルメント生成および結合の過程では、単一波長を用いるだけで、照射波長を切り替える必要がない。

【0122】

（実施例 5）

図13は、本実施例5に係る量子情報通信装置の概略構成を示した図である。同図に示すように、本実施例5に係る量子情報通信装置は、実施例4における光路中で、自由空間に光を伝播させていた部分のうち、半透鏡3101から光シャッター3501～3504の手前までの光路を、光ファイバー4801に置き換えている。また、光共振器4101～4106から検出器4301～4306までの間を、光ファイバー4802～4804に置き換えている。さらに、光を照射するガスセルを、光ファイバーのコアの部分にPrイオンを分散させたもの5601～5604に替え、そのイオンを分散した部分を減圧により1.4Kにした液体ヘリウム中に保持する。光路を光ファイバーに置き換える際には、光の入力用の集光レンズ4901～4911を利用し、またファイバーからの出力を平行光するレンズ4912～4925を利用する。また、実施例4において利用したビームスプリッターの替わりに、ファイバー光カップラー5001～5006を用いる。

【0123】

ファイバー中のPrイオン集団間のエンタングルメントは、照射するレーザーの角周波数、使用する光学素子の角周波数依存性、初期化の際に角周波数を振る範囲等を、ファイバー中のPrイオンの値に合わせて、実施例4と同様な方法によって生成することができる。特に、本実施例5では、光路の大部分に光ファイバーを利用しているため、量子情報通信装置として利用する際に、光学系調整等の保守の必要が少なく、また、光子検出器等の光学素子を比較的簡単かつ自由に配置できるようになっている。

【0124】

(実施例6)

本実施例6では、実施例5における光ファイバーのコア中のPrイオンを分散させた部分の替わりに、コアの外周部に微小な空洞が設けられた穴あきファイバーを用いる。このファイバーの空洞にルビジウムガスを充填し、当該ルビジウムガスを冷却せずに、実施例5と同様の方法で、エンタングルメント生成を行う。

【0125】

この様な構成によれば、コアの導波路部を通った光のエバネッセント光が空洞

部のルビジウムガスと相互作用し、実施例4の場合と同様、ルビジウムガスの間にエンタングルメントを生成することができる。

【0126】

(実施例7)

本実施例7では、実施例4におけるガスセルをリング型共振器の中に保持し、実施例4と同様の方法でエンタングルメントを生成する。共振器は、第1段階のエンタングルメント生成の際、各ルビジウム原子集団から発生させる光子の光子エネルギーに相当する角周波数に共鳴するものを用いる。

【0127】

図14は、本実施例7に係る量子情報通信装置において、ガスセル7001を中心に含むリング型共振器の構成を示した図である。ただし同図は、実施例4における $\lambda/2$ 板3701と3705の間、3702と3706の間、3703と3707の間、3704と3708の間にあった4箇所のガスセルと置き換えたガスセルを含むリング型共振器の一つを示している。他の3箇所も図14に示したのと同様の構成にて置き換える。

【0128】

このような構成により、比較的弱いレーザー照射でも効率的にエンタングルメント生成を行なうことができる。

【0129】

(第2の実施形態)

次に、第2の実施形態について説明する。本実施形態は、原子集団A (i) に光を照射するための光源として、単一のレーザー光源（例えば $|2\rangle - |3\rangle$ の間の遷移に近共鳴の角周波数 ω_3 の光パルス列のみを発生するレーザー光源）を使用し、当該レーザー光源から一定の繰り返し周波数で出力される光パルス列のみを利用して長距離間のエンタングルメントを生成する装置及び方法である。以下、図15を参照しながら、本実施形態に係る装置及び方法について説明する。

【0130】

図15は、本実施形態に係る量子情報通信装置の概略構成を説明するための図である。同図に示すように、量子情報通信装置は、光学系、物理系の集団A (i)

) (ただし、 $i = 1 \sim n$ の整数) 、第1層、第2層を具備している。第1の実施形態と異なるのは光学系である。

【0131】

光学系は、単一光源としてのレーザー光源30、光路W、ビームスプリッターG (i) (ただし、 $i = 1 \sim n$ の整数。) を有している。

【0132】

レーザー光源30は、単一光源として、 $|2\rangle - |3\rangle$ の間の遷移に近共鳴の角周波数 ω_3 の光パルス列のみを発生する。この角周波数 ω_3 は、状態 $|1\rangle$ と状態 $|3\rangle$ との遷移に対しては、離調が大きいとする。

【0133】

ビームスプリッターG (i) は、光路W上の各A (i) の近くに設けられ、照射された光パルスを分離させる。このビームスプリッターG (i) には、石英板などへの反射、透過を用いたものや、光ファイバーを近接させたりより合わせたりした光カプラーなどが利用できる。

【0134】

光路Wは、ミラー、プリズムなどで光学系を組み、自由空間に光を伝播させるものや、石英などの光学媒質で作製された光導波路や光ファイバー等である。なお、当該光路W中には、適宜光を収束させ又は整形するためのレンズや、偏光方向を調整する偏光子が設けられていてもよい。

【0135】

次に、本量子情報通信装置の動作について説明する。まず、レーザー光源30が、中心角周波数 ω_3 の光パルス列を発生する。この角周波数 ω_3 の光パルス列は、一列に並んだ原子集団A (1) からA (n) の物理系集団に沿って設けられた光路Wを伝播する。光路Wを伝播する光パルス列は、各A (i) の近くに設けられた照射光分岐用のビームスプリッターG (i) により分岐される。分岐された光パルス列は、各原子集団A (i) の手前に設置された高速光シャッターS1 (i) に入射する。このようにして、各原子集団A (i) に対応した高速光シャッターS1 (i) に、絶えず光パルス列が入射されるようになっている。

【0136】

ここで光パルス列の間隔は、エンタングルメント生成の第1段階で、高速光シャッターS1 ($2 \times k - 1$) とS1 ($2 \times k$) とが開かれて、原子集団A ($2 \times k - 1$) とA ($2 \times k$) とに照射された場合に、当該原子集団A ($2 \times k - 1$) とA ($2 \times k$) とで発生した角周波数 $\omega_3 - \omega_1$ の光子が、ビームスプリッタ-B1 (k) に同時に到達するように、光路長に対して設定されている。また、第2段階以降において、高速光シャッターS1 ($2 \times h$) とS1 ($2 \times h + 1$) とが開かれて原子集団A ($2 \times h$) とA ($2 \times h + 1$) とに照射された場合に、当該原子集団A ($2 \times h$) とA ($2 \times h + 1$) とで発生した角周波数 $\omega_3 + \omega_1$ の光子が、ビームスプリッタ-B2 (h) に同時に到達するように、光パルス列の間隔と光路長とが設定されている。ただし $k = 1, 2, 3 \dots, n/2$ 、 $h = 1, 2, 3 \dots, n/2 - 1$ である。

【0137】

全ての高速光シャッターS1 (i) を閉じた状態で、原子のエネルギー順位が |1> にあるように準備された原子集団A (i) に対し、第1段階として高速光シャッターS1 (i) が開き、第1の実施形態で説明したように、光子検出器D1 (i) が光子を検出すると、高速光シャッターS1 (i) が閉鎖される。また、第2段階のエンタングルメント結合のため、第2層に光パルス列を照射するためのシャッターが選択的に開く。その際、照射波長を切り替える必要はなく、レーザー光源30から第1段階でも第2段階以降でも、同じようにただ光パルス列を光路Wに送りつづければよい。

【0138】

すなわち、光子検出器による光子検出とこれに連動したシャッターの閉鎖とを、機械的駆動や角周波数（波長）切り替えなしに多段階実行することにより、第1段階と第2段階とで異なる角周波数の光を用いた第1の実施形態の場合と同じように、長距離間のエンタングルメントが生成できる。

【0139】

以上、本発明を実施形態に基づき説明したが、本発明の思想の範疇において、当業者であれば、各種の変更例及び修正例に想到し得るものであり、それら変形例及び修正例についても本発明の範囲に属するものと了解される。

【0140】

また、各実施形態は可能な限り適宜組み合わせて実施してもよく、その場合組合せた効果が得られる。さらに、上記実施形態には種々の段階の発明が含まれており、開示される複数の構成要件における適宜な組合せにより種々の発明が抽出され得る。例えば、実施形態に示される全構成要件から幾つかの構成要件が削除されても、発明が解決しようとする課題の欄で述べた課題が解決でき、発明の効果の欄で述べられている効果の少なくとも1つが得られる場合には、この構成要件が削除された構成が発明として抽出され得る。

【0141】

【発明の効果】

以上説明したように本発明によれば、動作時間のかかる機械的駆動を採用せず、高速で効率よくエンタングルメントの結合を行い、長距離間のエンタングルメント生成が可能になり、そのエンタングルメントを利用した長距離間の量子暗号、量子テレポーテーション等の量子情報通信が可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

図1は、iの昇順に一列に並んでいる物理系集団A (i) を示した図である。

【図2】

図2は、状態 | 2 > と状態 | 3 >との間の遷移及び状態 | 1 > と状態 | 3 >との間の遷移と、照射する光の中心角周波数との関係を説明するための図である。

【図3】

図3は、物理系集団A (1) とA (2) との間にエンタングルメント生成するための装置例を示した図である。

【図4】

図4は、物理系集団A (1) とA (2) との間でエンタングルメントを生成するための装置例を示した図である。

【図5】

図5は、物理系集団A (1) とA (5) との間にエンタングルメント生成するための装置例を示した図である。

【図6】

図6は、距離として $2q-1L$ 離れた物理系集団A(1)とA(n)と間で生成されたエンタングルメントを説明するための概念図である。

【図7】

図7は、第1の実施形態に係る量子情報通信装置の概略構成を示した図である。

【図8】

図8は、実施例1に係る量子情報通信装置の概略構成を示した図である。

【図9】

図9は、エンタングルメント生成を確認する手法を説明するための図である。

【図10】

図10は、実施例2に係る量子情報通信装置の概略構成を示した図である。

【図11】

図11は、実施例4に係る量子情報通信装置が有する原子集団A(i)のエネルギー準位を説明するための図である。

【図12】

図12は、実施例4に係る量子情報通信装置の概略構成を示した図である。

【図13】

図13は、本実施例5に係る量子情報通信装置の概略構成を示した図である。

【図14】

図14は、本実施例7に係る量子情報通信装置において、ガスセル7001を中心に含むリング型共振器の構成を示した図である。

【図15】

図15は、第2の実施形態に係る量子情報通信装置の概略構成を示した図である。

【符号の説明】

A(i)、1801～1804、…物理系集合

S1(i)、2303、2304、3501～3504…高速光シャッター

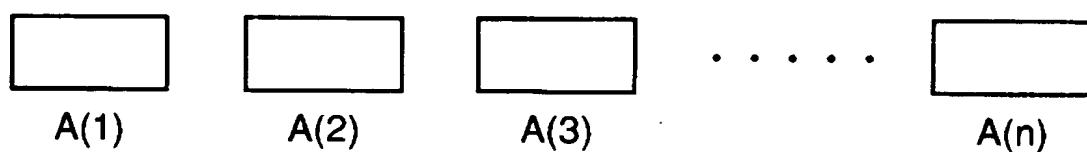
F i…角周波数選択用フィルター

B i、4 d、5 a、201～208、2101、2102、3002～300
4、4201～4203…ビームスプリッター
T、901、902…偏光ビームスプリッター
D i、1101～1106、2201～2204…光子検出器
P i…偏光子
S A、S B…エンタングルメント生成系
10…リング色素レーザー
30…レーザー光源
301～305、…音響光学効果素子
401～404…電気光学効果素子
501～503、3101…半透鏡
601～604、3203…ミラー
701～710、3701～3708… λ ／2板
801～806、1901～1904、4101～4106…光共振器
1001～1004… λ ／4板
1201～1203…信号処理回路
1402～1404、1601～1604…音響光学素子ドライバー
1701…制御回路
2001、2002…位相変調器
2601～2606、4901～4925…レンズ
2701、2702、4801～4804、5601～5604…光ファイバ
—
2801～2806、5001～5006…ファイバー光カップラー
3301、3302…電気光学効果素子
3801～3804、5601～5604、7001…ガスセル
4301～4306…検出器

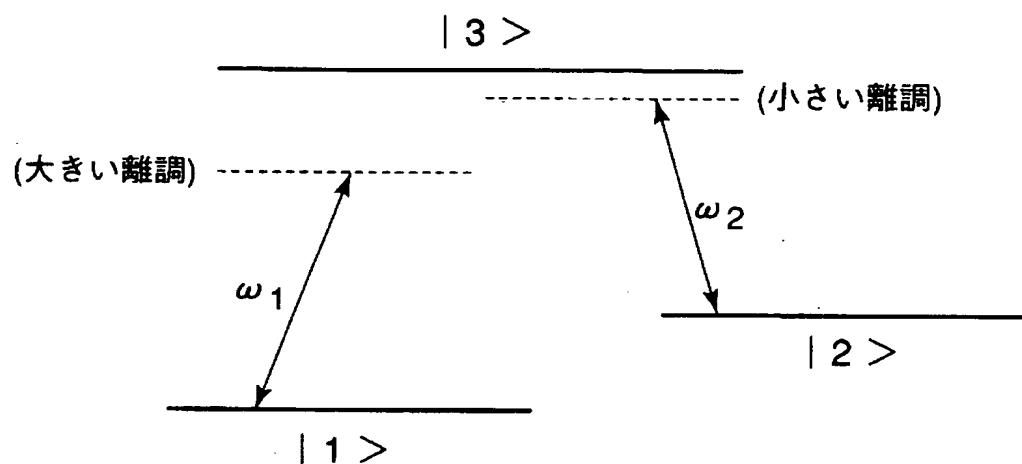
【書類名】

図面

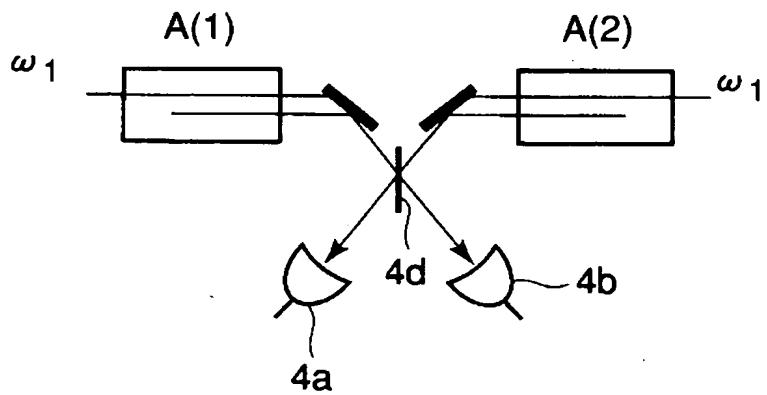
【図1】



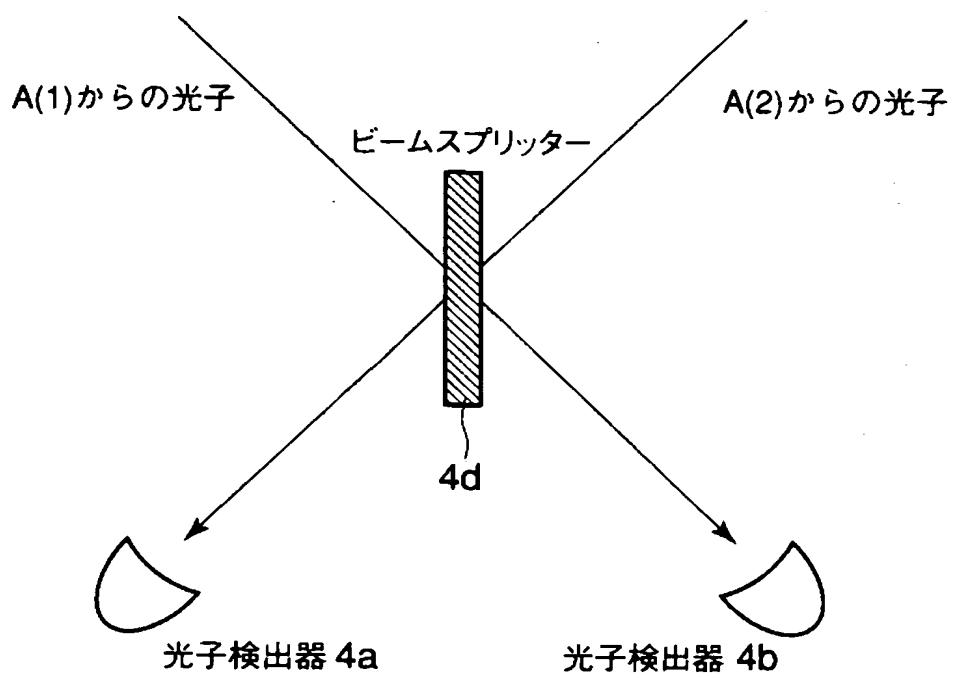
【図2】



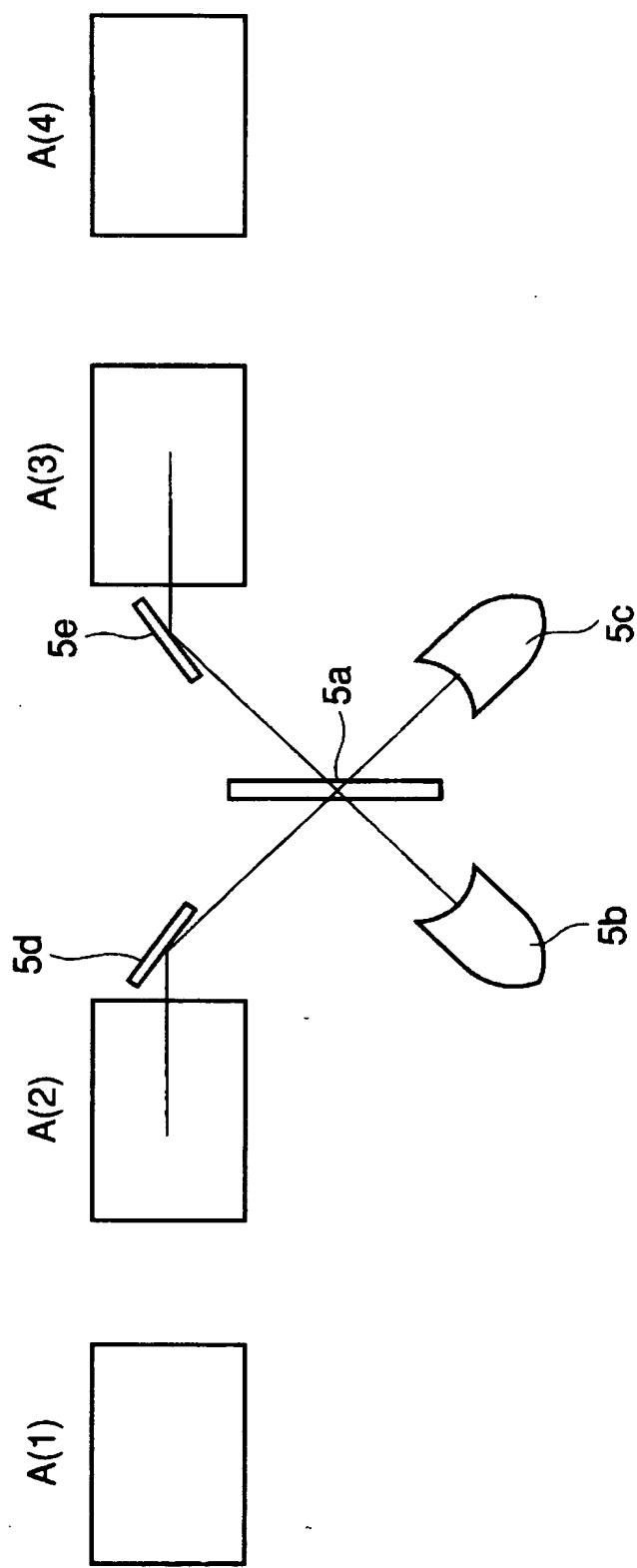
【図3】



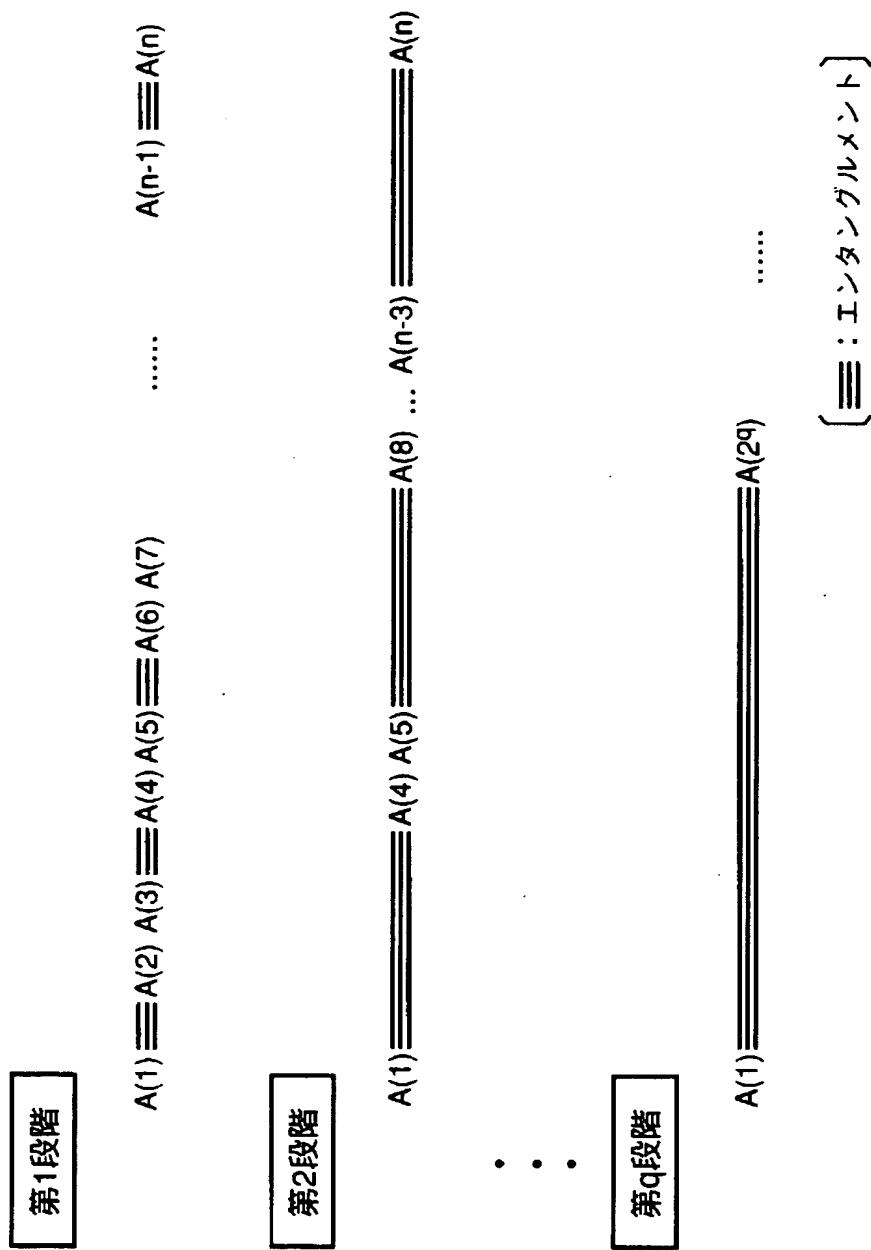
【図4】



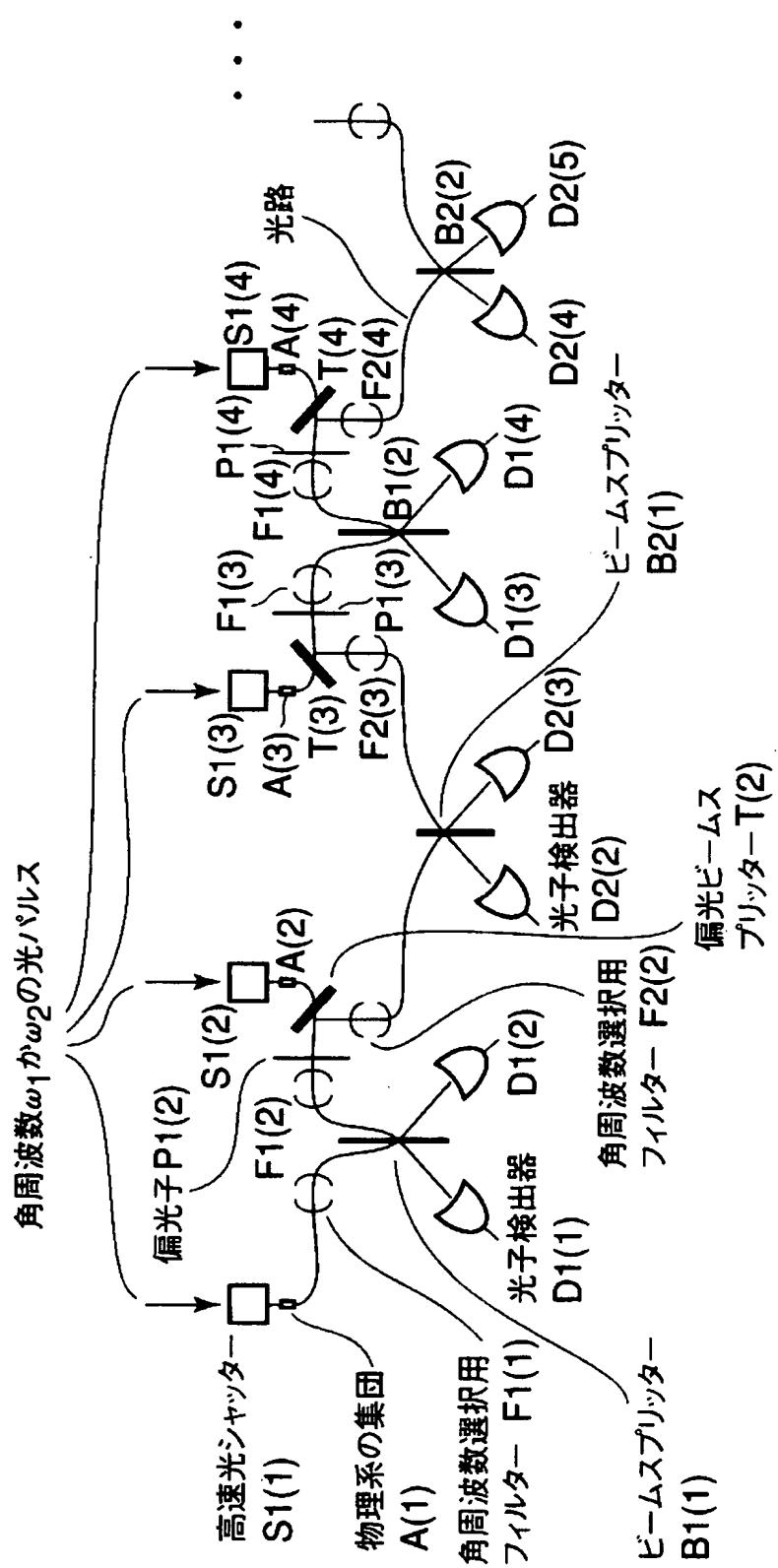
【図5】



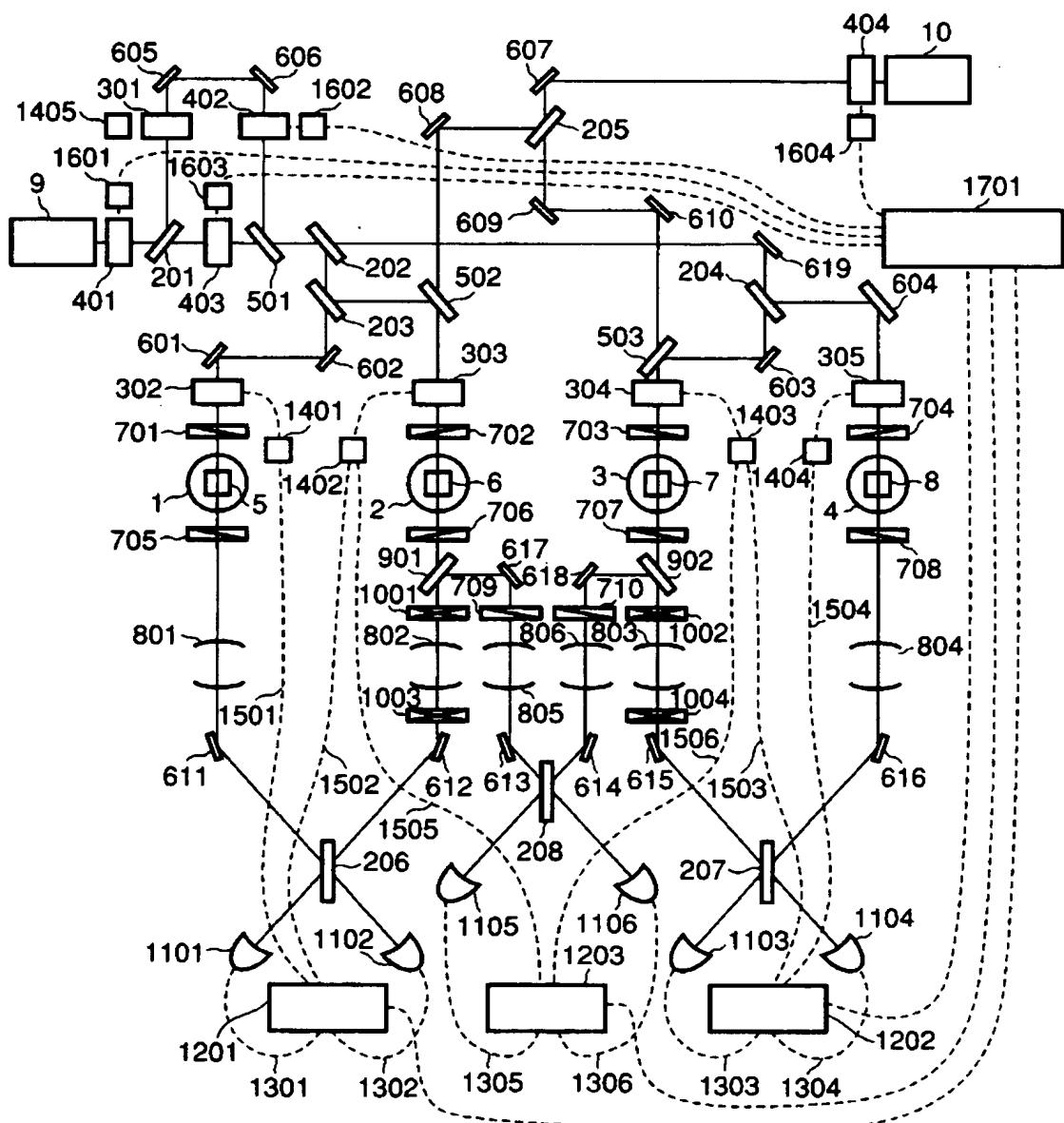
【図6】



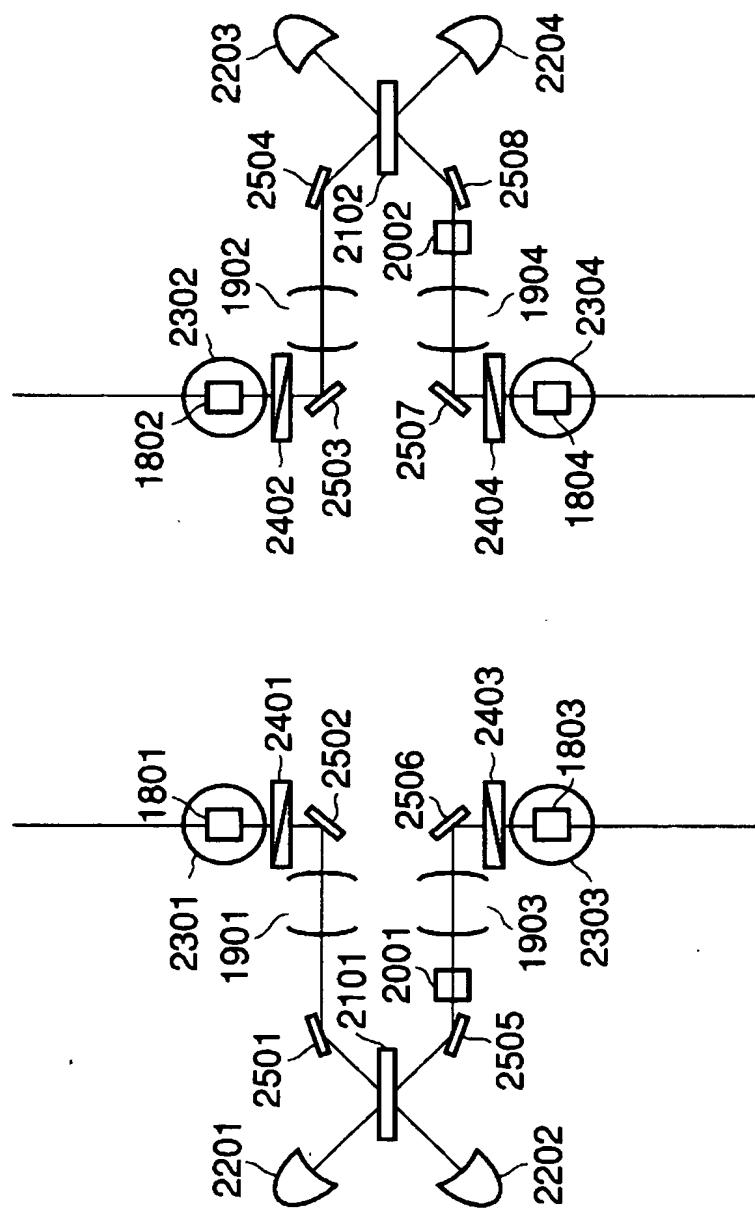
【図7】



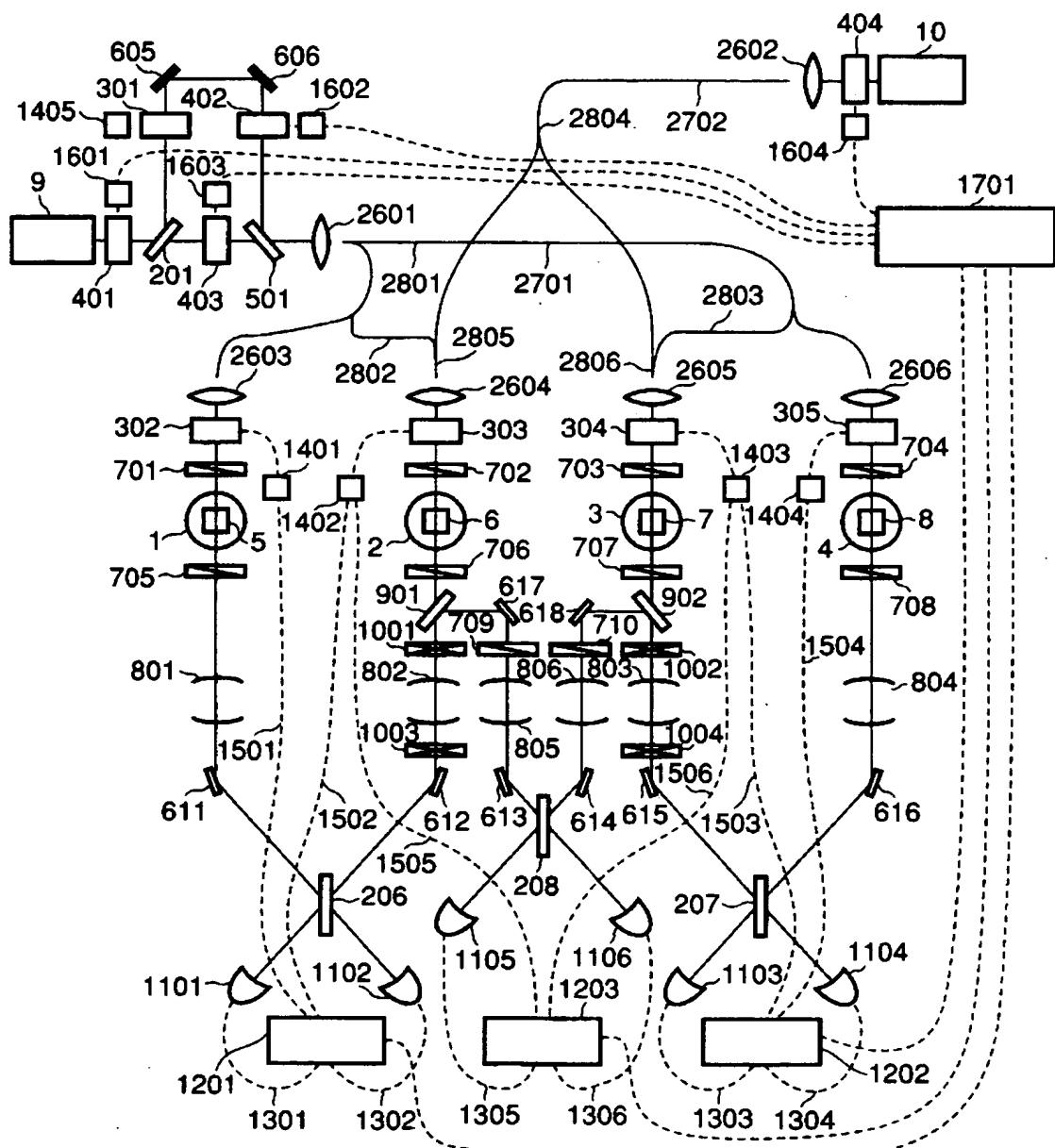
【図8】



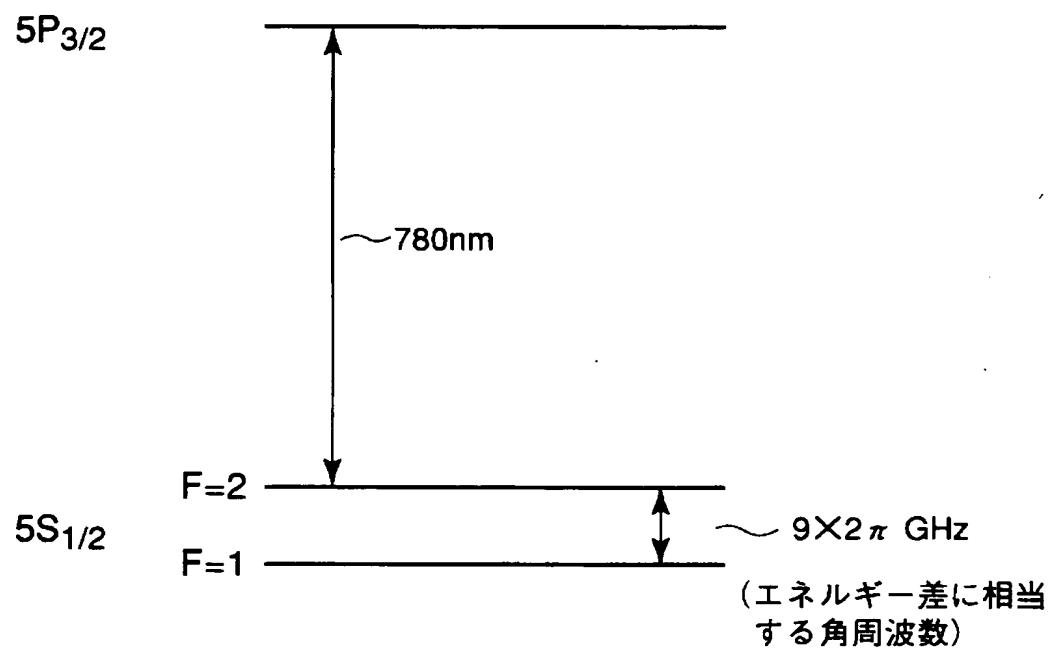
【図9】



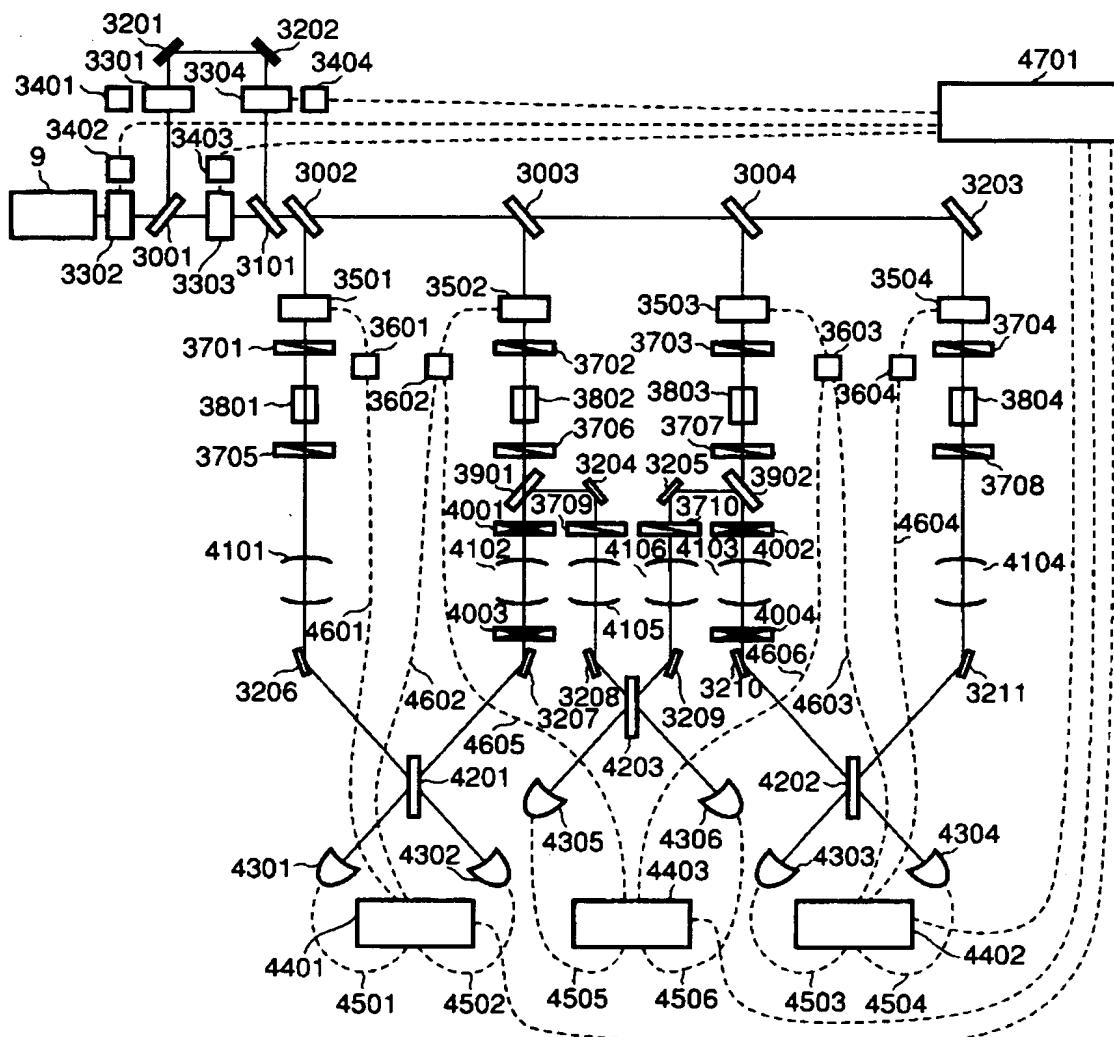
【図10】



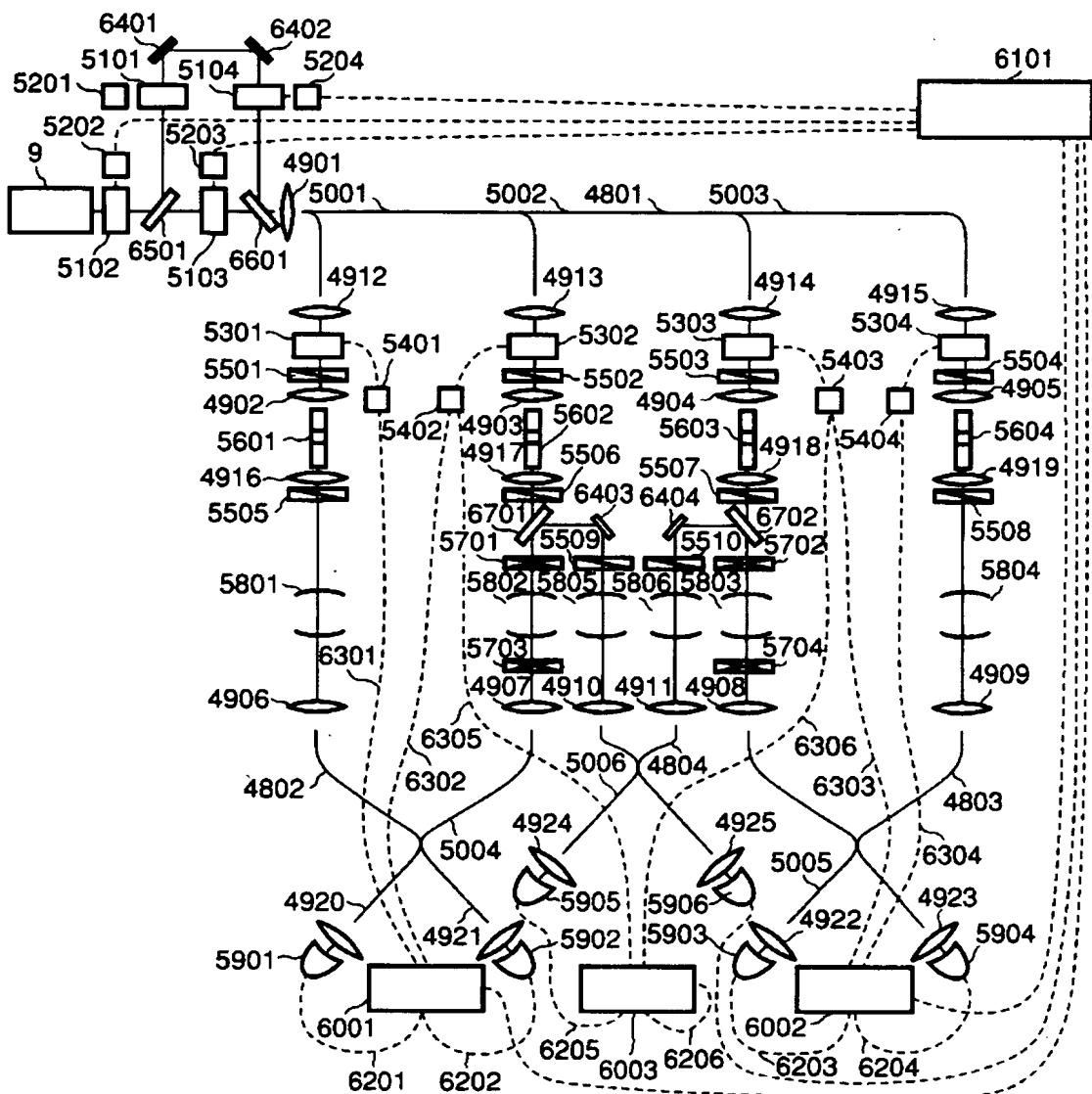
【図11】



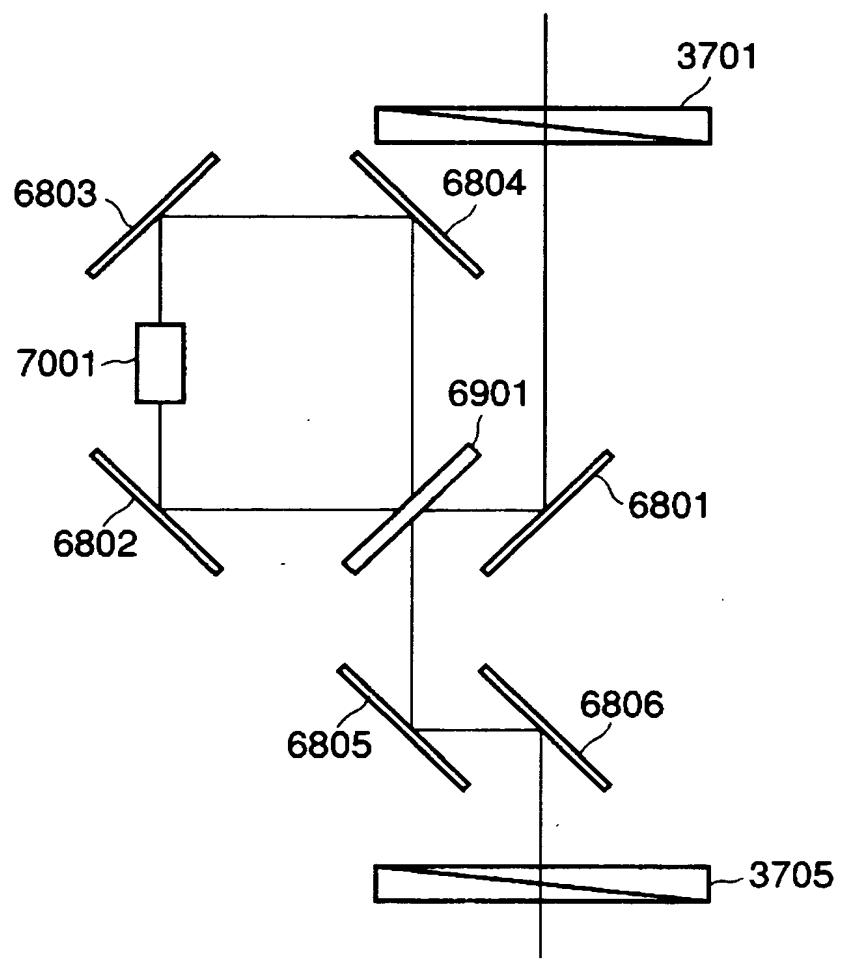
【図12】



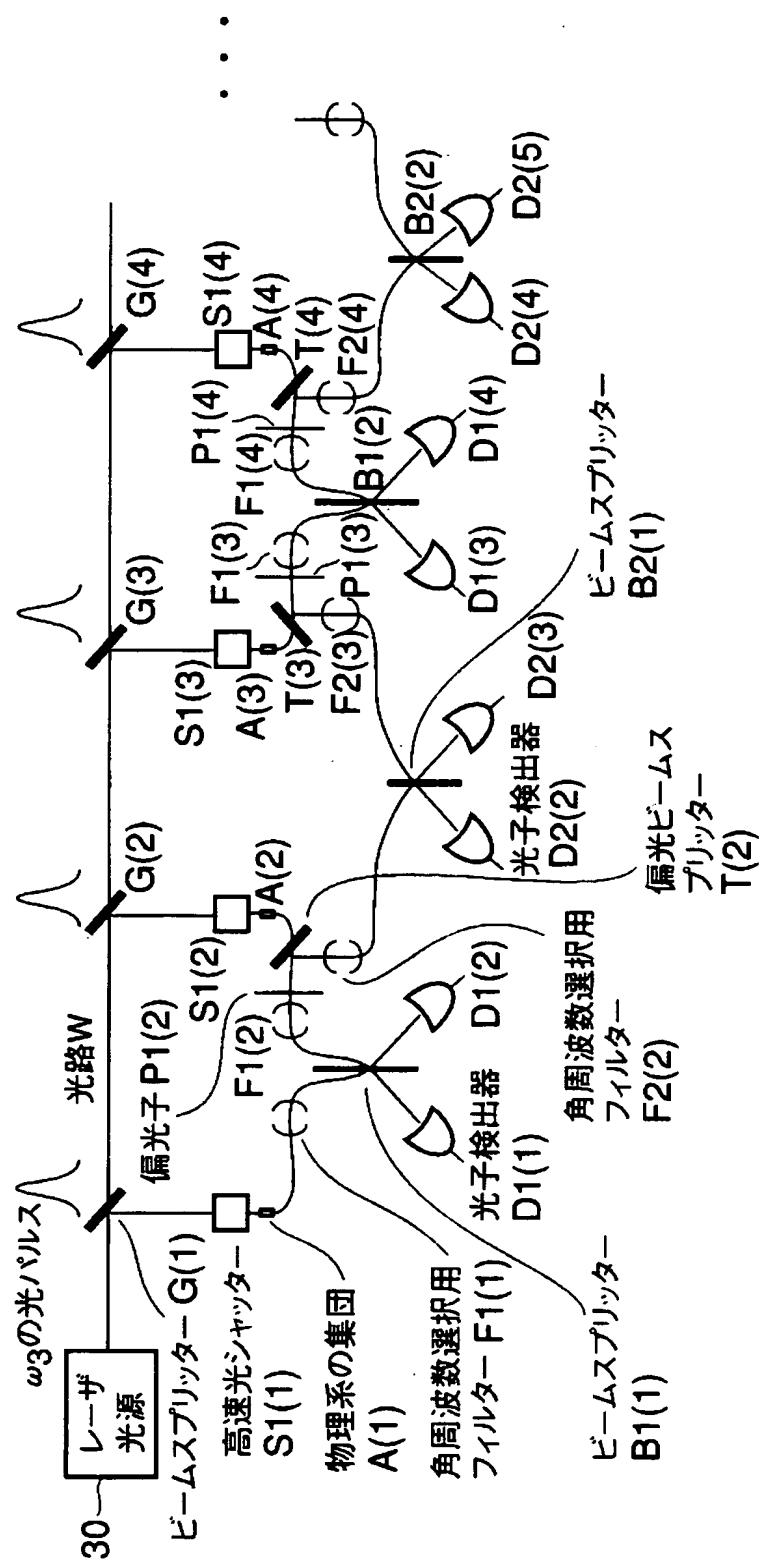
【図13】



【図14】



【図15】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 動作時間のかかる機械的駆動を採用せずに、すばやく効率よくエンタングルメントの結合を行い、長距離間のエンタングルメント生成を可能にする量子情報通信方法および量子情報通信装置を提供すること。

【解決手段】 2つの物理系集団間にエンタングルメントを生成する操作、および当該操作にてエンタングルメントで結ばれた物理系の組を複数結合して、エンタングルメントを生成する距離を延長する操作において、作動部を持たない受動素子と、能動素子ではあっても機械的作動部のない電気光学効果素子のような超高速動作可能な素子、および高速のパルス列を発生することが可能なレーザー光源、あるいは連続発振のレーザー光源のみを用いて、迅速に物理系のデコヒーレンス時間内にエンタングルメント生成、結合に必要な光照射と発生光子の測定を必要箇所で行う。

【選択図】 図1

特願 2002-290107

出願人履歴情報

識別番号 [000003078]

1. 変更年月日 2001年 7月 2日
[変更理由] 住所変更
住 所 東京都港区芝浦一丁目1番1号
氏 名 株式会社東芝

2. 変更年月日 2003年 5月 9日
[変更理由] 名称変更
住 所 变更
氏 名 東京都港区芝浦一丁目1番1号
株式会社東芝